



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE EMERGENCIA
MEDIANTE UN GRUPO ELECTRÓGENO PARA EL “BLOQUE E”
DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR:

RUBÉN DARIO ESPINOZA PURUNCAJA

TUTOR:

ING. CARLOS CHAVEZ CORDOVA

GUAYAQUIL – ECUADOR

2024-2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Rubén Darío Espinoza Puruncaja**, con documento de identificación N° **0925477796**, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la **Universidad Politécnica Salesiana** pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, **3 de septiembre del año 2025**

Atentamente,



RUBEN DARIO ESPINOZA PURUNCAJA
CI: 0925477796

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, **Rubén Darío Espinoza Puruncaja**, con documento de identificación N° **0925477796**, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la **Universidad Politécnica Salesiana** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: **“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE EMERGENCIA MEDIANTE UN GRUPO ELECTRÓGENO PARA EL ‘BLOQUE E’ DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA”**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: **Ingeniero Eléctrico**, en la **Universidad Politécnica Salesiana**, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la **Universidad Politécnica Salesiana**.

Guayaquil, **3 de septiembre del año 2025**

Atentamente,




RUBEN DARIO ESPINOZA PURUNCAJA
CI: 0925477796

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Carlos Fernando Chávez Córdova**, con documento de identificación N° **0919553438**, docente de la **Universidad Politécnica Salesiana**, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE EMERGENCIA MEDIANTE UN GRUPO ELECTRÓGENO PARA EL ‘BLOQUE E’ DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA”**, realizado por **Rubén Darío Espinoza Puruncaja**, con documento de identificación N° **0925477796**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Proyecto Técnico**, que cumple con todos los requisitos determinados por la **Universidad Politécnica Salesiana**.

Guayaquil, **3 de septiembre del año 2025**

Atentamente,



CARLOS FERNANDO CHAVEZ CORDOVA
CI: 0919553438

DEDICATORIA

A Dios, por la salud, la fortaleza y el trabajo que me permitieron mantenerme firme durante toda la carrera.

A mis tíos, pilares fundamentales en mi vida, cuyo apoyo y ejemplo han sido motores para nunca rendirme y seguir adelante en la búsqueda de mis sueños.

A mi madre, que a pesar de todas las dificultades estuvo siempre a mi lado, acompañándome con amor, paciencia y entrega incondicional. Este logro también es suyo, porque su esfuerzo y sacrificio han sido la base de mi superación.

A todas las personas que con su colaboración y conocimientos hicieron posible la realización de esta investigación.

Y, de manera especial, a quien fue mi compañera durante muchos años. Aunque hoy nuestros caminos se hayan separado, su compañía en distintas etapas de mi vida representó un impulso importante para salir adelante en este reto académico y personal.

RUBEN DARIO ESPINOZA PURUNCAJA

AGRADECIMIENTO

Mi reconocimiento, en primer lugar, a Dios, por ser la fuente de fortaleza y guía en cada momento de mi vida, permitiéndome culminar con éxito este proyecto académico.

Deseo expresar mi profundo aprecio a mis tíos **Julio Puruncaja** y **Juana Puruncaja**, cuyo respaldo constante y confianza en mis capacidades fueron determinantes para mantenerme enfocado en este objetivo.

Con especial cariño, agradezco a mi madre, **Viviana Puruncaja**, ejemplo de esfuerzo y dedicación, que con paciencia y amor me acompañó en cada etapa de este camino, siendo mi mayor motivación para no rendirme y seguir adelante.

Extiendo también mi agradecimiento a los docentes y profesionales que compartieron sus conocimientos y me brindaron orientación durante la realización de esta investigación, así como a todas aquellas personas que, de una u otra forma, contribuyeron a su desarrollo.

Finalmente, reconozco con gratitud a **Génesis Ruiz**, por haber sido mi compañera durante varios años y estar presente en distintas etapas de mi vida académica, acompañándome y animándome a superar los desafíos que este camino implicó.

RUBEN DARIO ESPINOZA PURUNCAJA

ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA	1
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
Capítulo I	1
1.1. Titulo	1
1.2. Introducción	1
1.3. Planteamiento del problema	2
1.4. Justificación	3
1.5. Delimitación del problema	5
1.6. Beneficiarios de la propuesta	5
1.7. Objetivos	7
1.7.1. Objetivo general.....	7
1.7.2. Objetivos específicos	7
1.7.3. Metodología y medios.....	7
Capítulo II	11
2.1. Sistemas de emergencia eléctrica	11
2.1.1. Definición y características generales	11
2.1.2. Importancia en la continuidad operativa	11
2.1.3. Tipos de sistemas de respaldo eléctrico	12
2.2. Fundamentos técnicos de los grupos electrógenos	14
2.2.1. Principios de funcionamiento	14
2.2.2. Componentes principales	15
2.2.3. Clasificación según tipo, potencia y aplicación.....	15
2.2.4. Tipos de combustibles utilizados	16
2.3. Criterios de dimensionamiento eléctrico.....	17

2.3.1.	Cálculo de la carga crítica	17
2.3.2.	Factores de simultaneidad y demanda máxima	18
2.3.3.	Factor de potencia y eficiencia energética.....	18
2.4.	Sistemas de transferencia automática (ATS).....	19
2.4.1.	Función dentro del sistema de respaldo	19
2.4.2.	Tipos de transferencia	20
2.4.3.	Tiempo de respuesta y reconexión.....	21
2.5.	Normativas y regulaciones técnicas.....	21
2.5.1.	Normas internacionales aplicables (NFPA 110, ISO 8528, NEC).....	21
2.5.2.	Reglamentación nacional y local vigente	22
2.5.3.	Normativas ambientales y de seguridad laboral	23
2.6.	Seguridad y mantenimiento del sistema de respaldo	24
2.6.1.	Procedimientos de operación segura	24
2.6.2.	Planes de mantenimiento preventivo y correctivo	25
2.6.3.	Protocolos de emergencia y capacitación.....	25
2.7.	Impacto ambiental y sostenibilidad	26
2.7.1.	Emisiones y contaminación acústica.....	26
2.7.2.	Alternativas sostenibles: biocombustibles y energía híbrida.....	27
2.7.3.	Tendencias en eficiencia energética y descarbonización	28
2.8.	Evaluación técnico-económica del sistema.....	29
2.8.1.	Costos de inversión y operación	29
2.8.2.	Análisis de rentabilidad y retorno de inversión (ROI)	29
2.8.3.	Comparación con otras tecnologías de respaldo.....	30
2.9.	Experiencias y antecedentes de implementación.....	31
2.9.1.	Casos de estudios	31
2.9.2.	Buenas prácticas en el diseño e instalación	32
2.9.3.	Lecciones aprendidas y mejoras continuas.....	33
Capítulo III	34
3.1.	Desarrollo del funcionamiento	34
3.1.1.	Análisis del sistema eléctrico actual del Bloque E	34
3.1.2.	Identificación de cargas críticas	41
3.1.3.	Selección y dimensionamiento del grupo electrógeno.....	45
3.1.4.	Sistema de transferencia automática (ATS)	49
3.1.5.	Integración con el sistema eléctrico existente	51
3.2.	Simulación	53
3.2.1.	Modelado del sistema en DigSILENT PowerFactory.....	53

3.2.2. Escenarios de simulación	56
3.2.3. Análisis de estabilidad transitoria	60
3.2.4. Análisis armónico	62
3.2.5. Análisis de calidad de energía	64
Capítulo IV	65
4.1. Análisis de resultados	65
4.1.1. Evaluación del desempeño del sistema propuesto	65
4.1.2. Análisis de confiabilidad y disponibilidad	70
4.1.3. Análisis económico detallado.....	75
4.1.4. Análisis de sensibilidad.....	81
4.1.5. Comparación con alternativas tecnológicas	86
4.2. Cronograma	89
4.2.1. Planificación general del proyecto.....	89
4.2.2. Cronograma detallado por fases	90
4.2.3. Recursos y responsabilidades	94
4.2.4. Gestión de riesgos del cronograma.....	95
4.3. Viabilidad técnica y conclusiones y recomendaciones	96
4.3.1. Evaluación de viabilidad técnica	96
4.3.2. Análisis de riesgos técnicos.....	100
Conclusiones	105
Recomendaciones	107
Bibliografía.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Análisis actual del sistema eléctrico del Bloque E de la UPS en digsilent</i>	34
Figura 2 <i>Transformador trifásico</i>	35
Figura 3 <i>Distribución de cargas</i>	37
Figura 4 <i>Demanda energética</i>	38
Figura 5 <i>Resultados potencia activa, por línea y total</i>	39
Figura 6 <i>Resultados potencia reactiva, por línea y total</i>	39
Figura 7 <i>Resultados potencia aparente, por línea y total</i>	40
Figura 8 <i>Identificación de cargas críticas</i>	42
Figura 9 <i>Factores de simultaneidad</i>	43
Figura 10 <i>Curva de eficiencia</i>	47
Figura 11 <i>Sistema de Transferencia Automática</i>	49
Figura 12 <i>Proceso de control y operación</i>	50
Figura 13 <i>Integración con el sistema eléctrico existente</i>	51
Figura 14 <i>Simulación en digsilent</i>	53
Figura 15 <i>Escenarios de simulación</i>	57
Figura 16 <i>Análisis de Estabilidad</i>	62
Figura 17 <i>Análisis Armónico</i>	63
Figura 18 <i>Análisis comparativo de los escenarios simulados</i>	66
Figura 19 <i>Análisis de confiabilidad</i>	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Tipos de sistemas de respaldo eléctrico</i>	12
Tabla 2 <i>Análisis de calidad de energía</i>	40
Tabla 3 <i>Análisis de calidad de energía</i>	42
Tabla 4 <i>Estabilidad de frecuencia</i>	64

RESUMEN

La Universidad Politécnica Salesiana enfrenta interrupciones frecuentes del suministro eléctrico que paralizan las actividades académicas y administrativas del Bloque E, afectando equipos sensibles, sistemas de seguridad y continuidad educativa, generando riesgos operativos y de seguridad para la comunidad universitaria. El objetivo general fue diseñar un sistema eléctrico de emergencia mediante un grupo electrógeno para garantizar la continuidad de las actividades académicas y administrativas ante fallas en el suministro eléctrico. La metodología empleó un enfoque mixto cualitativo-cuantitativo, incluyendo análisis energético detallado, mediciones de consumo eléctrico, cálculo de cargas críticas, selección técnica de equipos según normativas NFPA 110 e IEEE 446, y simulaciones operativas mediante software DigSILENT PowerFactory para evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios de carga. Los resultados determinaron una demanda máxima de 84.3 kVA para cargas críticas, requiriendo un grupo electrógeno de 125 kVA con margen de seguridad del 25%, logrando parámetros de calidad energética dentro de límites normativos, confiabilidad del 97% anual y disponibilidad del 99.5%. La propuesta técnica incluye un sistema integral con motor diésel de 100 kW, alternador síncrono trifásico, sistema de transferencia automática, autonomía de 39 horas y cumplimiento de estándares ambientales EPA Tier 3. El análisis económico demostró viabilidad excepcional con VPN de \$754,200, TIR del 98.5% y período de recuperación de 1.1 años. Se concluye que el sistema propuesto es técnica y económicamente factible, garantizando continuidad operativa, seguridad institucional y cumplimiento normativo para el fortalecimiento de la infraestructura universitaria.

Palabras clave:

Sistema emergencia eléctrica, grupo electrógeno, continuidad energética, infraestructura universitaria, análisis viabilidad

ABSTRACT

The Salesian Polytechnic University faces frequent power outages that paralyze academic and administrative activities in Block E, affecting sensitive equipment, security systems, and educational continuity, generating operational and security risks for the university community. The overall objective was to design an emergency electrical system using a generator to ensure the continuity of academic and administrative activities in the event of power failures. The methodology employed a mixed qualitative-quantitative approach, including detailed energy analysis, power consumption measurements, critical load calculations, technical equipment selection according to NFPA 110 and IEEE 446 standards, and operational simulations using DigSILENT PowerFactory software to evaluate system performance under different load scenarios. The results determined a maximum demand of 84.3 kVA for critical loads, requiring a 125 kVA generator with a 25% safety margin, achieving power quality parameters within regulatory limits, 97% annual reliability, and 99.5% availability. The technical proposal includes a comprehensive system with a 100 kW diesel engine, a three-phase synchronous alternator, an automatic transfer system, a 39-hour runtime, and compliance with EPA Tier 3 environmental standards. The economic analysis demonstrated exceptional viability with an NPV of \$754,200, an IRR of 98.5%, and a payback period of 1.1 years. It is concluded that the proposed system is technically and economically feasible, ensuring operational continuity, institutional security, and regulatory compliance to strengthen the university infrastructure.

Keywords:

Emergency electrical system, generator set, energy continuity, university infrastructure, feasibility analysis

Capítulo I

1.1. Título

Diseño y Evaluación de un Sistema de Emergencia mediante un Grupo Electrógeno para el “Bloque E” de la Universidad Politécnica Salesiana.

1.2. Introducción

En los últimos años, la Universidad Politécnica Salesiana ha enfrentado una serie de dificultades provocadas por la inestabilidad del servicio eléctrico. Esta situación ha generado múltiples interrupciones en el desarrollo de las actividades académicas, afectando directamente tanto a estudiantes como a docentes. En muchas ocasiones, los cortes de energía han sorprendido en plena jornada, paralizando clases, evaluaciones y el uso de herramientas tecnológicas esenciales para la enseñanza. Según Magallanes Ponguillo (2025) Esto no solo retrasa el avance de los contenidos curriculares, sino que también impacta negativamente en la calidad del aprendizaje y la continuidad pedagógica.

Cuando se producen estas fallas eléctricas, los efectos son inmediatos: los sistemas informáticos se apagan sin previo aviso, las aulas quedan a oscuras y los laboratorios pierden su funcionalidad. Según Sotomayor Mosquera (2021) En un entorno donde la tecnología juega un rol fundamental para la educación, la ausencia de electricidad interrumpe completamente las dinámicas de trabajo. Además, estas interrupciones pueden dañar equipos sensibles, alterar el calendario académico y generar un clima de incertidumbre entre los distintos miembros de la comunidad universitaria.

A pesar de que la institución cuenta con instalaciones modernas y bien equipadas, la falta de un sistema de respaldo energético limita su capacidad para afrontar este tipo de eventualidades. Esta carencia representa una vulnerabilidad importante, especialmente si se considera que, en casos de emergencia como incendios, evacuaciones o situaciones médicas, la energía eléctrica es crucial para mantener la operatividad de los sistemas de comunicación, iluminación y seguridad. Para Chakraborty et al. (2023), la ausencia de un mecanismo de respaldo puede agravar los riesgos y poner en peligro la integridad de las personas que se encuentran dentro del campus.

Ante esta realidad, surge la necesidad urgente de implementar un sistema de emergencia que contemple el uso de un grupo electrógeno como fuente de energía alternativa. Este equipo permitirá mantener en funcionamiento los servicios básicos e indispensables del

edificio, incluso durante apagones prolongados. Su instalación garantizará que los espacios educativos continúen operativos, que los sistemas de seguridad no se vean comprometidos y que el personal pueda actuar de manera efectiva ante cualquier contingencia.

La propuesta contempla, además, la identificación de las especificaciones técnicas que debe cumplir el grupo electrógeno, considerando la carga total que debe respaldar, los equipos críticos que requieren protección y los estándares normativos aplicables. Se busca no solo adquirir un equipo que cubra las necesidades actuales del Bloque E, sino también que tenga la capacidad de adaptarse a futuras ampliaciones o requerimientos. La evaluación técnica incluirá un análisis detallado del consumo energético, el tipo de conexión necesaria y la autonomía operativa requerida en función de la duración estimada de los cortes eléctricos.

En definitiva, la implementación de este sistema de emergencia no solo representa una respuesta técnica frente a un problema recurrente, sino también una apuesta institucional por la prevención, la seguridad y la continuidad educativa. Con esta iniciativa, la Universidad Politécnica Salesiana podrá enfrentar con mayor resiliencia los desafíos que impone el contexto energético actual, asegurando que su labor formativa no se vea interrumpida y que su comunidad cuente con un entorno más seguro y funcional para desarrollar sus actividades cotidianas.

1.3. Planteamiento del problema

La Universidad Politécnica Salesiana, particularmente en su sede de Guayaquil, ha experimentado una serie de dificultades relacionadas con la inestabilidad del servicio eléctrico. Esta situación afecta directamente al Bloque E, un espacio clave donde se desarrollan actividades académicas y administrativas esenciales. Contreras Paredes y Altamirano Córdova (2015) mencionan que las interrupciones de energía, que se presentan de manera sorpresiva y con creciente frecuencia, ocasionan una paralización momentánea de las labores, generando incertidumbre y retrasos en los distintos procesos que allí se llevan a cabo.

Cuando ocurre un corte eléctrico, los sistemas que sostienen el funcionamiento diario del bloque como los equipos informáticos, los laboratorios y la iluminación quedan fuera de servicio de manera inmediata. Esta situación impacta tanto en el desarrollo normal de las

clases como en la organización institucional. La desconexión repentina de los dispositivos impide continuar con prácticas, presentaciones o gestiones académicas, lo que, a la larga, afecta tanto a estudiantes como a docentes en su rendimiento y planificación.

A ello se suma una preocupación latente en torno a la seguridad del personal y de los propios estudiantes. Un corte de luz deja en penumbras al Bloque E, dificultando el tránsito y la orientación dentro del edificio. En un escenario de emergencia, como un sismo o un incendio, esta falta de visibilidad y de sistemas operativos puede representar un riesgo real. Sin alarmas, luces de emergencia o comunicación efectiva, cualquier incidente podría agravarse y tornarse difícil de controlar, poniendo en peligro a quienes se encuentren en el lugar.

Por otro lado, muchos de los equipos instalados en los laboratorios son altamente sensibles a las variaciones en el suministro de energía. La desconexión brusca o una sobrecarga puede dañar seriamente estos instrumentos, cuyo costo de reposición es elevado y cuyo uso es indispensable para prácticas académicas. Esta constante amenaza no solo compromete la calidad del aprendizaje técnico, sino que también supone una carga adicional en términos de recursos institucionales y planificación operativa.

Más allá del contexto inmediato, este problema se enmarca dentro de una realidad más amplia que afecta a buena parte del país. Las deficiencias estructurales del sistema eléctrico, combinadas con factores climáticos y limitaciones técnicas, han provocado que los cortes de energía se conviertan en algo recurrente (Ávila Zambrano & Macías Muñoz, 2022). En este escenario, la Universidad, a pesar de su compromiso con la calidad educativa y el desarrollo tecnológico, enfrenta limitaciones evidentes que dificultan su normal funcionamiento. Esta situación ha generado una preocupación creciente entre los miembros de la comunidad universitaria, que reconocen la necesidad de atender con urgencia este desafío operativo.

1.4. Justificación

La instalación de un sistema de respaldo energético mediante un grupo electrógeno en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana representa una acción estratégica clave para asegurar la continuidad operativa de las actividades académicas y administrativas. En un entorno cada vez más vulnerable a interrupciones del suministro eléctrico ya sea por causas climáticas, fallos en la red pública o sobrecargas del sistema resulta

imprescindible contar con una fuente de energía alternativa que garantice el funcionamiento ininterrumpido del campus.

Uno de los principales beneficios que ofrece un grupo electrógeno es la capacidad de mantener activos equipos esenciales como computadoras, sistemas de iluminación, redes de comunicación y otros dispositivos tecnológicos. De este modo, se previene la paralización de clases, prácticas de laboratorio, procesos administrativos y trabajos de investigación, actividades fundamentales para el desarrollo de la vida universitaria. Evitar estas interrupciones no solo facilita la continuidad del aprendizaje, sino que también contribuye al cumplimiento de los objetivos institucionales en términos de calidad académica.

Además de su papel operativo, este tipo de sistema cumple una función crítica en materia de seguridad. En momentos de emergencia como puede ocurrir durante incendios, temblores u otros eventos imprevistos, la disponibilidad inmediata de energía resulta vital para mantener iluminadas las zonas de evacuación, activar sistemas de alarma y permitir el uso de medios de comunicación internos. Esta capacidad de respuesta inmediata puede marcar la diferencia entre una evacuación ordenada y una situación de riesgo innecesario para los ocupantes del edificio.

Más allá de responder a una problemática puntual, la propuesta de implementar este sistema de emergencia también refleja una visión institucional orientada hacia la resiliencia, la planificación preventiva y la mejora continua de su infraestructura. Apostar por un grupo electrógeno no es solamente invertir en tecnología, sino en la tranquilidad y seguridad de toda la comunidad universitaria. De hecho, esta iniciativa se alinea con un compromiso más amplio de la Universidad Politécnica Salesiana por garantizar espacios académicos funcionales, seguros y modernos, incluso ante situaciones adversas.

Cabe destacar que el Bloque E alberga actualmente diversos laboratorios, así como oficinas académicas y de gestión de varias carreras. Por tanto, su correcto funcionamiento resulta esencial para el desarrollo cotidiano de múltiples actividades clave. La implementación del sistema de respaldo garantizará que los procesos educativos y administrativos no se vean afectados por eventuales fallos en el suministro eléctrico, beneficiando directamente a estudiantes, docentes y personal administrativo.

En suma, la propuesta de instalar un grupo electrógeno en este edificio no solo atiende una necesidad técnica, sino que constituye una medida estratégica de gran valor institucional. Asegura la continuidad de las labores universitarias, protege la integridad de los usuarios del campus y proyecta una imagen de compromiso con la calidad y el bienestar. En un contexto donde la incertidumbre energética puede generar múltiples afectaciones, adoptar soluciones de este tipo se convierte en un componente esencial para la sostenibilidad operativa de la institución.

1.5. Delimitación del problema

Este proyecto de investigación tiene previsto ejecutarse durante el año 2025 y se centrará específicamente en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, ubicado en la ciudad de Guayaquil. Esta zona se encuentra bajo la cobertura operativa de la unidad de negocio CNEL EP Guayaquil, la cual regula el suministro eléctrico del sector. Cabe destacar que el Bloque E alberga áreas clave como laboratorios y oficinas académicas que requieren un funcionamiento constante y confiable.

Para el diseño del sistema de emergencia, se tomarán en cuenta datos reales de consumo eléctrico obtenidos directamente del edificio. Esta información será fundamental para establecer con precisión la capacidad necesaria del grupo electrógeno, asegurando que el sistema esté preparado para responder adecuadamente ante interrupciones del suministro eléctrico. De este modo, se busca ofrecer una solución realista y viable que responda a las condiciones y necesidades energéticas actuales del entorno universitario.

1.6. Beneficiarios de la propuesta

Dentro del marco del presente trabajo de titulación, se identifican diversos beneficiarios que se verán directa e indirectamente favorecidos por el diseño y la evaluación de un sistema de emergencia basado en un grupo electrógeno para el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana.

En primer lugar, los principales beneficiarios serán los propios autores del proyecto. A lo largo del desarrollo de esta investigación, no solo consolidarán los conocimientos adquiridos durante su formación universitaria, sino que también tendrán la oportunidad de aplicar de forma práctica conceptos fundamentales de ingeniería eléctrica en un entorno real. Esta experiencia contribuirá significativamente a su crecimiento profesional, preparándolos para asumir con responsabilidad y solvencia técnica los retos propios del

ejercicio de su futura carrera. Además, el trabajo realizado será un respaldo para su titulación como Ingenieros en Electricidad, lo que representa una meta académica y personal de gran valor.

Por otro lado, la Universidad Politécnica Salesiana también se verá beneficiada con este proyecto, al sumar una nueva investigación aplicada a su trayectoria institucional. Esta contribución fortalece el compromiso de la universidad con la generación de soluciones prácticas e innovadoras orientadas a la mejora continua de su infraestructura. Asimismo, permite evidenciar la calidad formativa que ofrece la institución al preparar profesionales capaces de diseñar propuestas técnicas viables, seguras y alineadas con las necesidades reales de su entorno.

Cabe destacar también que el Bloque E, como objeto de estudio, será un beneficiario directo del sistema de respaldo eléctrico propuesto. Este edificio alberga diversos laboratorios, direcciones de carrera y espacios académicos esenciales, cuya operatividad no puede verse comprometida ante fallas en el suministro eléctrico. La instalación de un grupo electrógeno garantizará la continuidad de las actividades tanto administrativas como académicas, aportando seguridad, funcionalidad y eficiencia energética al campus.

Además, este proyecto representa una oportunidad para dotar a la universidad de una solución energética moderna y confiable, diseñada a medida de sus necesidades. La propuesta incorpora criterios técnicos actuales que permiten asegurar un suministro estable durante situaciones críticas, lo cual es esencial en un contexto donde la energía es un recurso estratégico para la educación superior.

Finalmente, se considera que este trabajo puede servir como referencia para futuras investigaciones similares, no solo dentro de la universidad, sino también en otras instituciones educativas que busquen implementar sistemas de emergencia energéticos eficientes. De esta manera, el impacto del presente proyecto trasciende su ejecución puntual, aportando a una cultura de prevención y mejora continua en el ámbito académico y técnico.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Diseñar un sistema eléctrico de emergencia mediante un grupo electrógeno en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, para garantizar la continuidad de las actividades académicas y administrativas ante fallas en el suministro eléctrico.

1.7.2. Objetivos específicos

- Identificar la demanda máxima del bloque E realizando el estudio energético y cálculo respectivo para identificar la capacidad de respaldo
- Seleccionar el grupo electrógeno, mediante cálculos normativos para trabajar a máxima operatividad de carga
- Simular la operación del grupo electrógeno, por medio del software DIGSILENT para obtener resultados del comportamiento ante variación de carga

1.7.3. Metodología y medios

Según Cuenca Churo y Enríquez Guillén (2021) la metodología representa un pilar fundamental dentro de cualquier proceso investigativo, ya que permite conectar de forma directa al investigador con el objetivo que se desea alcanzar. A través de ella se definen las unidades de análisis, se seleccionan las técnicas de observación y se establecen los mecanismos adecuados para la recolección de datos, lo cual proporciona estructura y coherencia al estudio. En este proyecto en particular, se ha optado por un enfoque explicativo que combina tanto métodos cualitativos como cuantitativos (Hernandez Sampieri et al., 2014). Esta elección responde a la necesidad de recopilar y analizar información desde diferentes perspectivas para comprender con mayor profundidad el comportamiento del grupo electrógeno, el cual será simulado mediante el software especializado DigSILENT PowerFactory.

La ejecución del proyecto se sustenta en los datos obtenidos de las lecturas previas del grupo electrógeno, los cuales servirán como base para alimentar el modelo de simulación dentro del software mencionado. De esta manera, será posible observar el flujo de carga bajo diversas condiciones operativas. Cabe destacar que la metodología no se limita únicamente a la elección de técnicas o instrumentos, sino que abarca el conjunto de acciones planificadas que permiten desarrollar cada etapa del proyecto de manera ordenada y coherente. De hecho, cuando se habla de un proceso de investigación, es común que se haga énfasis en la importancia del enfoque cualitativo para acercarse a la

realidad del problema y del enfoque cuantitativo para validar datos con mayor objetividad. Ambos enfoques se complementan entre sí y, junto con la metodología, conforman la base operativa del estudio.

El marco metodológico, por tanto, constituye una sección esencial del proyecto, ya que en él se establece con claridad cómo se llevará a cabo el estudio. En el caso de la investigación titulada Diseño y evaluación de un sistema de emergencia mediante un grupo electrógeno para el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, este marco cobra especial relevancia, pues garantiza que cada decisión técnica y cada fase de análisis respondan tanto a criterios científicos como a las necesidades reales del entorno de estudio.

En cuanto al enfoque metodológico adoptado, se ha decidido implementar una estrategia mixta, la cual combina herramientas cualitativas y cuantitativas. Esta combinación tiene como propósito lograr un diseño más completo y una evaluación más certera del sistema propuesto. A través de este enfoque se pretende cumplir con los requerimientos técnicos del sistema eléctrico, pero también atender las particularidades y necesidades concretas del Bloque E, especialmente en lo que respecta a su funcionamiento durante situaciones críticas como interrupciones del suministro eléctrico.

Como primer paso, se desarrollará una fase exploratoria de corte cualitativo. Esta etapa incluirá entrevistas y encuestas dirigidas al personal administrativo, técnico y a los usuarios frecuentes del Bloque E. El objetivo de esta actividad será conocer de primera mano las experiencias que han tenido frente a los cortes de energía, los efectos que estas interrupciones han provocado en las actividades diarias, y las expectativas que existen en torno al nuevo sistema de respaldo. Toda esta información permitirá delimitar con precisión los requerimientos del sistema que se va a diseñar.

Una vez obtenida esa visión general desde lo cualitativo, se avanzará hacia una fase cuantitativa, en la cual se realizará un análisis energético detallado del edificio. Para ello, se recopilarán datos sobre el consumo actual a través de mediciones en tiempo real y también se revisarán las facturas eléctricas de los últimos meses. Esta etapa permitirá identificar cuáles son los equipos más sensibles o críticos que deben mantenerse operativos en caso de un corte de energía. También se calculará la carga total que deberá

soportar el grupo electrógeno, lo que será clave para seleccionar un equipo con la capacidad adecuada y que cumpla con los criterios de seguridad y eficiencia.

En cuanto al diseño general de la investigación, este se enmarca dentro de un enfoque descriptivo y aplicado. Por un lado, se pretende describir con precisión cómo funciona actualmente el sistema eléctrico del Bloque E, cuál es su comportamiento en momentos de emergencia y cuál es la necesidad específica que se busca atender con la implementación del grupo electrógeno. Por otro lado, el carácter aplicado de la investigación responde a la intención de ofrecer una solución concreta y útil para un problema real, en este caso, la falta de suministro eléctrico en momentos críticos.

Para cumplir con los objetivos planteados, se seguirá un procedimiento metodológico bien estructurado. La primera etapa consistirá en determinar la demanda máxima de energía del Bloque E. Para lograr esto, se realizarán mediciones en sitio utilizando equipos especializados como analizadores de redes, y se complementará con un análisis documental de planos eléctricos y facturas de consumo. También se identificará la carga crítica, es decir, aquellos equipos que no pueden dejar de funcionar bajo ninguna circunstancia, y se establecerá el perfil de carga, observando las variaciones de consumo durante diferentes horarios del día.

La siguiente etapa será la selección del grupo electrógeno más adecuado. Este proceso tomará en cuenta diversas normativas técnicas como la NFPA 110 e IEEE 446, además de las recomendaciones de los fabricantes. Se calculará la capacidad del equipo considerando un margen de seguridad del 25% sobre la carga crítica estimada, y se definirán características como tipo de combustible, autonomía, sistema de arranque y condiciones de operación. Esto asegurará que el equipo seleccionado no solo cumpla con los requisitos técnicos, sino que también sea viable para las condiciones reales de uso.

Una vez definido el grupo electrógeno, se procederá con la simulación de su operación utilizando el software DigSILENT PowerFactory. En esta fase se modelará el sistema eléctrico del Bloque E y se simularán distintos escenarios de funcionamiento. Entre ellos se incluirán situaciones como el arranque inicial del equipo, la variación progresiva de las cargas y fallas en la red eléctrica que requieran la transferencia automática hacia el grupo electrógeno. A partir de estas simulaciones se evaluarán aspectos como la

estabilidad de la tensión, la frecuencia y la capacidad de respuesta del sistema ante cambios abruptos.

En lo que respecta a las técnicas e instrumentos para la recolección de datos, se utilizarán analizadores de redes eléctricas para registrar parámetros clave como potencia activa, reactiva, tensión, corriente, factor de potencia y distorsión armónica. Además, se emplearán multímetros de precisión para realizar mediciones en puntos específicos de la instalación. Complementariamente, se revisarán documentos como facturas de energía eléctrica y se realizará una observación directa del Bloque E para evaluar el estado actual del sistema y levantar un inventario de los equipos que deben contar con respaldo energético.

Durante la fase de simulación, se contará con el apoyo de profesionales con experiencia en modelado eléctrico, quienes facilitarán la representación del sistema en condiciones lo más cercanas posibles a la realidad. Este trabajo permitirá verificar si el grupo electrógeno propuesto es capaz de responder adecuadamente ante escenarios críticos, y proporcionará datos confiables para ajustar el diseño si fuese necesario.

Finalmente, la etapa de validación de resultados será crucial para asegurar que la propuesta desarrollada cumple efectivamente con los requerimientos del Bloque E. Para ello, se compararán los resultados obtenidos mediante las simulaciones con los parámetros de diseño establecidos previamente. Esta comparación permitirá detectar posibles desviaciones, evaluar la confiabilidad operativa del equipo y realizar ajustes técnicos en caso necesario. Además, se llevará a cabo un proceso de socialización de resultados con el personal técnico y administrativo de la universidad. Este intercambio de opiniones permitirá incorporar observaciones operativas que contribuirán a perfeccionar el diseño. Así, se garantizará que el sistema propuesto no solo sea técnicamente viable, sino también funcional, pertinente y ajustado a las condiciones reales de uso del edificio.

Capítulo II

2.1. Sistemas de emergencia eléctrica

2.1.1. Definición y características generales

Los sistemas de emergencia eléctrica constituyen infraestructuras críticas diseñadas para garantizar el suministro continuo de energía eléctrica cuando la fuente principal de alimentación experimenta interrupciones o fallas. Según Chakraborty et al. (2023), estos sistemas representan una solución tecnológica integral que combina equipos de generación, sistemas de control automático, dispositivos de transferencia y elementos de protección, todos coordinados para activarse de manera inmediata ante la pérdida del suministro eléctrico convencional.

Las características fundamentales de estos sistemas incluyen su capacidad de respuesta automática, la cual debe ser prácticamente instantánea para evitar interrupciones en procesos críticos. Como señala Sotomayor Mosquera (2021), la confiabilidad constituye otro pilar fundamental, ya que estos sistemas deben operar bajo condiciones adversas y mantener su funcionalidad durante períodos prolongados. La modularidad permite adaptar la capacidad del sistema según las necesidades específicas de cada instalación, mientras que la redundancia asegura que existan múltiples niveles de respaldo para garantizar la continuidad del servicio.

La integración tecnológica moderna ha incorporado sistemas de monitoreo remoto, diagnóstico predictivo y control inteligente, transformando los sistemas de emergencia tradicionales en soluciones sofisticadas capaces de optimizar su rendimiento y anticipar necesidades de mantenimiento. Esta evolución tecnológica, documentada por Vaca Romo (2021) en su investigación sobre sistemas de monitoreo inalámbrico, ha mejorado significativamente la eficiencia operativa y ha reducido los costos de mantenimiento a largo plazo.

2.1.2. Importancia en la continuidad operativa

La continuidad operativa en el entorno empresarial e industrial moderno depende críticamente de la disponibilidad ininterrumpida de energía eléctrica. Las interrupciones del suministro eléctrico pueden generar pérdidas económicas devastadoras, comprometer la seguridad de las personas, causar daños irreversibles a equipos sensibles y afectar la reputación corporativa de manera permanente.

En sectores como la salud, las telecomunicaciones, la banca, los centros de datos y la industria manufacturera, incluso interrupciones breves del suministro eléctrico pueden tener consecuencias catastróficas. Bullon Salazar (1974) en su estudio pionero sobre sistemas eléctricos de emergencia en hospitales, demostró que los hospitales requieren energía continua para mantener equipos de soporte vital, mientras que Ponce Gómez (2023) confirma en su investigación más reciente que esta necesidad se ha intensificado con la modernización de los equipos médicos.

Los centros de datos necesitan alimentación constante para preservar la integridad de la información, y las instalaciones industriales dependen de la electricidad para mantener procesos productivos complejos que no pueden detenerse sin generar pérdidas significativas. Marqusee et al. (2021) analizan específicamente el impacto de la confiabilidad de los generadores diésel de emergencia en microrredes y sistemas conectados a edificios, demostrando que la implementación de sistemas de emergencia eléctrica no solo protege contra pérdidas económicas directas, sino que también preserva la continuidad de servicios esenciales para la sociedad.

2.1.3. Tipos de sistemas de respaldo eléctrico

Los sistemas de respaldo eléctrico se clasifican en diversas categorías según su tecnología, capacidad, tiempo de respuesta y aplicación específica, en la tabla 1 se muestra un resumen de los tipos más conocidos.

Tabla 1

Tipos de sistemas de respaldo eléctrico

Tipo de sistema	Características principales	Aplicaciones	Ventajas	Limitaciones
UPS (Sistemas de Alimentación Ininterrumpida)	Respaldo inmediato mediante baterías, autonomía limitada, transferencia instantánea.	Equipos electrónicos sensibles, protección contra fluctuaciones y microcortes.	Respuesta instantánea, protege contra variaciones de voltaje.	Autonomía corta, limitado a cargas pequeñas o medianas.
Grupos electrógenos	Funcionamiento continuo según disponibilidad de combustible, escalables a diferentes cargas.	Respaldo de media y larga duración en hogares, comercios e industrias.	Versátiles, operan durante días o semanas, amplia capacidad.	Requieren combustible y mantenimiento, generan ruido y emisiones.

Sistemas híbridos	Combinan UPS, grupos electrógenos y energías renovables (solar/eólica).	Centros de datos, instalaciones críticas, proyectos sostenibles.	Alta confiabilidad, eficiencia, menor impacto ambiental y costos operativos.	Complejidad técnica, inversión inicial elevada.
Baterías de ion-litio	Almacenamiento moderno, respuesta instantánea, silenciosas, bajo mantenimiento.	Respaldo en aplicaciones residenciales, comerciales e integración con renovables.	Operación limpia, posibilidad de gestión de demanda y arbitraje energético.	Costo inicial elevado, vida útil limitada por ciclos de carga.

Los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) proporcionan respaldo inmediato mediante baterías, ofreciendo tiempos de autonomía limitados pero con transferencia instantánea. Estos sistemas son ideales para equipos electrónicos sensibles que requieren protección contra fluctuaciones de voltaje y micro-interrupciones.

Los grupos electrógenos representan la solución más versátil y ampliamente utilizada para respaldo de media y larga duración. Como documenta Cuenca Churo y Enríquez Guillén (2021) en su estudio sobre dimensionamiento de generadores estacionarios, estos sistemas pueden operar durante días o semanas, dependiendo de la disponibilidad de combustible, y pueden dimensionarse para alimentar desde pequeñas cargas hasta instalaciones industriales completas.

Los sistemas híbridos combinan múltiples tecnologías para optimizar el rendimiento y la eficiencia. Magallanes Ponguillo (2025) presenta un diseño innovador de sistema híbrido con grupo electrógeno y banco de baterías que demuestra cómo pueden integrar UPS para respaldo inmediato, grupos electrógenos para autonomía extendida, y sistemas de energía renovable como paneles solares o turbinas eólicas para reducir el consumo de combustibles fósiles. Shezan et al. (2021) confirman que esta configuración híbrida maximiza la confiabilidad mientras minimiza el impacto ambiental y los costos operativos.

Los sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías de ion-litio han emergido como una alternativa moderna que ofrece respuesta instantánea, operación silenciosa y mantenimiento mínimo. Aunque su costo inicial es elevado, estos sistemas proporcionan

beneficios adicionales como la capacidad de participar en programas de gestión de demanda y arbitraje energético.

2.2. Fundamentos técnicos de los grupos electrógenos

2.2.1. Principios de funcionamiento

Los grupos electrógenos operan bajo el principio fundamental de conversión de energía química en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Este proceso de conversión múltiple se inicia con la combustión controlada de combustible en un motor de combustión interna, el cual transforma la energía química del combustible en energía mecánica rotacional a través del movimiento de pistones y el cigüeñal.

Long et al. (2020) desarrollaron un modelo paramétrico avanzado para generadores diésel en simulaciones de microrredes, demostrando que la energía mecánica generada por el motor se transmite directamente a un alternador eléctrico, el cual convierte el movimiento rotacional en energía eléctrica mediante el principio de inducción electromagnética. Este proceso involucra la rotación de un rotor magnetizado dentro de un estator con bobinados, generando un campo magnético variable que induce corrientes eléctricas en las bobinas del estator.

El control preciso de la velocidad del motor es fundamental para mantener la frecuencia eléctrica dentro de los parámetros requeridos. Shah et al. (2022) presentan un modelo de alta fidelidad de generadores diésel eléctricos independientes con configuración híbrida de turbina-gobernador, mostrando que los sistemas modernos utilizan reguladores electrónicos de velocidad que ajustan automáticamente el suministro de combustible para mantener una velocidad constante de 1800 RPM para generadores de 60 Hz o 1500 RPM para generadores de 50 Hz.

La regulación de voltaje se logra mediante sistemas de excitación automática que controlan la corriente de campo del alternador. Estos sistemas monitorean continuamente el voltaje de salida y ajustan la excitación para mantener un voltaje estable independientemente de las variaciones de carga. Los reguladores automáticos de voltaje modernos incorporan funciones avanzadas como compensación de caída de voltaje, protección contra sobreexcitación y sincronización automática para operación en paralelo.

2.2.2. Componentes principales

El motor de combustión interna constituye el corazón del grupo electrógeno y determina en gran medida su confiabilidad y eficiencia. Los motores diésel son los más utilizados debido a su durabilidad, eficiencia de combustible y capacidad para operar durante períodos prolongados. Ávila Zambrano y Macías Muñoz (2022) en su trabajo de rehabilitación de un grupo electrógeno universitario, documentan que estos motores incorporan sistemas de inyección de combustible de alta precisión, sistemas de enfriamiento por líquido o aire, y sistemas de lubricación forzada para garantizar una operación confiable bajo condiciones de carga variable.

El alternador eléctrico es responsable de la conversión final de energía mecánica a eléctrica. Los alternadores síncronos sin escobillas son la configuración estándar debido a su menor mantenimiento y mayor confiabilidad. Estos alternadores incorporan sistemas de excitación sin contacto que eliminan el desgaste de componentes y reducen significativamente los requisitos de mantenimiento.

El sistema de control y protección integra múltiples funciones críticas incluyendo el arranque automático, la monitorización de parámetros operativos, la protección contra condiciones anormales y la interfaz con sistemas externos. Grimaldo Gonzáles y Garay Lozano (2025) desarrollaron un sistema avanzado de monitoreo de variables que demuestra cómo los controladores modernos incorporan pantallas táctiles, comunicación por red, registro de eventos y capacidades de diagnóstico remoto.

El sistema de combustible incluye tanques de almacenamiento, bombas de transferencia, filtros, y sistemas de monitoreo de nivel. Contreras Paredes y Altamirano Córdova (2015) diseñaron un sistema innovador de alimentación de combustible con regulación automática del caudal de biogás, demostrando que el dimensionamiento adecuado del sistema de combustible es crucial para garantizar la autonomía requerida del sistema.

2.2.3. Clasificación según tipo, potencia y aplicación

La clasificación de grupos electrógenos según su tipo de servicio establece categorías fundamentales que determinan su diseño y especificaciones técnicas. Los grupos electrógenos de servicio de emergencia están diseñados para operar únicamente durante interrupciones del suministro principal, con limitaciones en las horas de operación anual.

Estos sistemas priorizan la confiabilidad de arranque sobre la eficiencia de combustible y están optimizados para períodos de operación relativamente cortos.

Los grupos electrógenos de servicio principal están diseñados para operar como fuente primaria de energía durante períodos prolongados o de manera continua. Estos sistemas incorporan motores de mayor durabilidad, sistemas de enfriamiento más robustos y componentes dimensionados para operación continua. Su diseño prioriza la eficiencia de combustible y la durabilidad a largo plazo.

La clasificación por potencia abarca desde unidades portátiles de pocos kilovatios hasta instalaciones industriales de varios megavatios. Los grupos electrógenos residenciales típicamente van de 5 a 50 kW y están diseñados para alimentar cargas domésticas esenciales. Temoche Paz (2024) presenta un sistema de control automático para una empresa comercial que ejemplifica las unidades comerciales que abarcan de 50 a 500 kW y están optimizadas para edificios de oficinas, centros comerciales y pequeñas industrias.

Los grupos electrógenos industriales superan los 500 kW y pueden alcanzar varios megavatios para aplicaciones como centros de datos, hospitales, instalaciones manufactureras e infraestructura crítica. Estas unidades incorporan tecnologías avanzadas como sistemas de control distribuido, operación en paralelo y capacidades de sincronización con la red eléctrica.

2.2.4. Tipos de combustibles utilizados

El diésel representa el combustible más utilizado en grupos electrógenos debido a su alta densidad energética, estabilidad de almacenamiento y disponibilidad global. Los motores diésel ofrecen eficiencia superior, menor consumo de combustible y mayor durabilidad comparado con otras opciones. El diésel puede almacenarse de manera segura durante períodos prolongados con aditivos apropiados, lo que lo hace ideal para aplicaciones de emergencia.

El gas natural ha ganado popularidad debido a su menor costo, menores emisiones y disponibilidad a través de redes de distribución existentes. Los grupos electrógenos de gas natural eliminan la necesidad de almacenamiento de combustible en el sitio y reducen significativamente las emisiones de partículas y óxidos de azufre. Sin embargo, la dependencia de la infraestructura de gas natural puede comprometer la confiabilidad durante desastres naturales.

El gas licuado de petróleo (GLP) ofrece un compromiso entre la conveniencia del gas natural y la independencia del diésel. El GLP puede almacenarse en tanques en el sitio, proporciona combustión más limpia que el diésel y está ampliamente disponible. Los sistemas de GLP requieren equipos especializados de manejo de gas y sistemas de seguridad adicionales.

Los biocombustibles representan una alternativa sostenible que puede utilizarse en motores diésel con modificaciones mínimas o nulas. Contreras Paredes y Altamirano Córdova (2015) demostraron la viabilidad del biogás como combustible alternativo, mostrando que el biodiésel puede mezclarse con diésel convencional en diversas proporciones, reduciendo las emisiones de carbono y la dependencia de combustibles fósiles.

2.3. Criterios de dimensionamiento eléctrico

2.3.1. Cálculo de la carga crítica

El dimensionamiento preciso de un grupo electrógeno requiere un análisis exhaustivo de la carga crítica que debe alimentar durante una emergencia. Este proceso comienza con la identificación y clasificación de todas las cargas eléctricas según su criticidad operativa. Cuenca Churo y Enríquez Guillén (2021) desarrollaron una metodología integral para el estudio de la demanda en el dimensionamiento de generadores estacionarios, demostrando que las cargas críticas incluyen sistemas de seguridad, equipos de soporte vital, sistemas de comunicación, iluminación de emergencia y equipos esenciales para la continuidad del negocio.

La determinación de la carga crítica involucra el análisis de la potencia activa, reactiva y aparente de cada equipo. La potencia activa representa la energía real consumida por los equipos, mientras que la potencia reactiva está asociada con equipos inductivos como motores y transformadores. La potencia aparente, que es la combinación vectorial de ambas, determina la capacidad real requerida del alternador.

El análisis debe considerar las características de arranque de los equipos, particularmente motores eléctricos que pueden requerir corrientes de arranque de 5 a 7 veces su corriente nominal. Esta consideración es crucial para evitar el dimensionamiento insuficiente del grupo electrógeno, que podría resultar en fallas de arranque de equipos críticos o sobrecarga del generador.

La evaluación temporal de la carga es igualmente importante, ya que diferentes equipos pueden operar en horarios distintos o tener ciclos de trabajo variables. El análisis debe identificar el pico de demanda máxima que podría ocurrir durante una emergencia, considerando escenarios donde múltiples equipos podrían arrancar simultáneamente.

2.3.2. Factores de simultaneidad y demanda máxima

Los factores de simultaneidad reflejan la probabilidad de que múltiples cargas operen simultáneamente a su capacidad máxima. En la mayoría de las instalaciones, es estadísticamente improbable que todos los equipos operen al 100% de su capacidad al mismo tiempo. La aplicación apropiada de factores de simultaneidad permite optimizar el dimensionamiento del grupo electrógeno sin comprometer la confiabilidad del sistema.

Gallegos Londoño et al. (2020) presentan un modelo para mejorar la red de distribución de energía mediante grupo electrógeno y apoyo con condensadores, demostrando que el factor de demanda máxima considera las variaciones temporales en el consumo de energía y la diversidad de cargas. Este factor reconoce que la demanda real de una instalación típicamente es menor que la suma aritmética de todas las cargas conectadas.

La determinación de factores de simultaneidad requiere un análisis detallado de los patrones de operación de la instalación. Los datos históricos de consumo eléctrico, cuando están disponibles, proporcionan información valiosa para establecer factores realistas. En ausencia de datos históricos, se deben utilizar factores conservadores basados en estándares de la industria y experiencia profesional.

La consideración de cargas futuras es esencial en el proceso de dimensionamiento. Las instalaciones típicamente experimentan crecimiento en sus cargas eléctricas a lo largo del tiempo, y el grupo electrógeno debe dimensionarse para acomodar expansiones razonables. Un factor de crecimiento del 20-25% es comúnmente aplicado para permitir expansiones futuras sin requerir el reemplazo del equipo.

2.3.3. Factor de potencia y eficiencia energética

El factor de potencia representa la relación entre la potencia activa y la potencia aparente en un sistema eléctrico, y tiene un impacto significativo en el dimensionamiento del grupo electrógeno. Un factor de potencia bajo indica la presencia de cargas reactivas que requieren corriente adicional sin contribuir al trabajo útil, lo que resulta en la necesidad de un alternador de mayor capacidad.

Los alternadores de grupos electrógenos típicamente están clasificados para operar con un factor de potencia de 0.8 inductivo. Cuando las cargas tienen un factor de potencia menor, la capacidad útil del alternador se reduce proporcionalmente. Por ejemplo, un alternador de 100 kVA puede entregar solo 60 kW a un factor de potencia de 0.6, comparado con 80 kW a un factor de potencia de 0.8.

La corrección del factor de potencia mediante capacitores puede mejorar la eficiencia del sistema y reducir los requisitos de capacidad del grupo eléctrico. Sin embargo, la corrección del factor de potencia debe implementarse cuidadosamente para evitar condiciones de sobrevoltaje cuando las cargas inductivas se desconectan súbitamente.

La eficiencia energética del grupo eléctrico varía significativamente con el nivel de carga. La mayoría de los grupos eléctricos operan con máxima eficiencia entre el 75% y 85% de su capacidad nominal. La operación a cargas muy bajas resulta en eficiencia reducida, mayor consumo específico de combustible y potencial acumulación de depósitos de carbón en el motor.

2.4. Sistemas de transferencia automática (ATS)

2.4.1. Función dentro del sistema de respaldo

Los sistemas de transferencia automática constituyen el cerebro operativo de cualquier instalación de respaldo eléctrico, coordinando la transición seamless entre la fuente de energía principal y el sistema de emergencia. Sotomayor Mosquera (2021) en su diseño y construcción de un sistema de emergencia automático mediante grupo eléctrico, demuestra que su función trasciende la simple conmutación de circuitos, abarcando el monitoreo continuo de la calidad de la energía, la evaluación de condiciones de falla, y la gestión inteligente de la secuencia de transferencia y retransferencia.

El ATS monitorea continuamente parámetros críticos de la fuente principal incluyendo voltaje, frecuencia, secuencia de fases y distorsión armónica. Cuando detecta condiciones anormales que exceden los límites preestablecidos, inicia automáticamente la secuencia de arranque del grupo eléctrico y prepara la transferencia de carga. Esta capacidad de monitoreo avanzado permite detectar no solo fallas completas del suministro, sino también condiciones de calidad de energía deficiente que podrían dañar equipos sensibles.

La coordinación temporal es fundamental en la operación del ATS. El sistema debe permitir tiempo suficiente para que el grupo eléctrico alcance condiciones estables de

voltaje y frecuencia antes de transferir la carga. Simultáneamente, debe minimizar el tiempo de interrupción para cargas críticas. Esta optimización temporal requiere un balance cuidadoso entre la protección del equipo y la continuidad del servicio.

La función de retransferencia es igualmente crítica, ya que debe evaluar no solo el retorno de la fuente principal, sino también su estabilidad y calidad antes de transferir la carga de vuelta. El ATS típicamente incorpora temporizadores de retransferencia que aseguran que la fuente principal haya estado estable durante un período predeterminado antes de ejecutar la retransferencia.

2.4.2. Tipos de transferencia

Los sistemas de transferencia se clasifican principalmente en dos categorías: transferencia abierta y transferencia cerrada. La transferencia abierta, también conocida como break-before-make, desconecta completamente la carga de una fuente antes de conectarla a la otra. Este método es el más común debido a su simplicidad, confiabilidad y menor costo. Sin embargo, resulta en una breve interrupción del suministro durante la transferencia.

Chowdhury et al. (2019) analizan sistemas de respaldo de emergencia conectados a la red, demostrando que la transferencia cerrada o make-before-break permite una transición sin interrupción al sincronizar las dos fuentes antes de transferir la carga. Este método requiere equipos más sofisticados y costosos, incluyendo sistemas de sincronización que igualan voltaje, frecuencia y ángulo de fase entre las fuentes.

Los sistemas de transferencia suave utilizan tecnología de electrónica de potencia para minimizar los transitorios durante la transferencia. Estos sistemas pueden ajustar gradualmente la transferencia de carga entre fuentes, reduciendo el estrés en los equipos y mejorando la calidad de la energía durante la transición. Aunque más costosos, estos sistemas ofrecen beneficios significativos para cargas sensibles.

La transferencia por zonas permite dividir la carga total en múltiples grupos que pueden transferirse secuencialmente. Este enfoque reduce la demanda instantánea en el grupo electrógeno durante el arranque y permite priorizar cargas críticas. La transferencia secuencial también facilita el arranque de motores grandes que requieren corrientes de arranque elevadas.

2.4.3. Tiempo de respuesta y reconexión

El tiempo de respuesta del sistema ATS comprende múltiples componentes que deben optimizarse para cada aplicación específica. El tiempo de detección de falla típicamente varía entre 1 y 10 segundos, dependiendo de los parámetros monitoreados y los límites de tolerancia establecidos. Tiempos de detección más cortos proporcionan respuesta más rápida pero pueden resultar en arranques innecesarios debido a perturbaciones transitorias.

El tiempo de arranque del grupo electrógeno varía según el tipo de motor, las condiciones ambientales y el estado de mantenimiento del equipo. Los motores diésel típicamente requieren entre 10 y 30 segundos para alcanzar condiciones estables de operación. Los sistemas de precalentamiento pueden reducir este tiempo, pero incrementan el consumo de energía en modo de espera.

El tiempo total de transferencia, desde la detección de la falla hasta la energización completa de las cargas críticas, típicamente varía entre 15 y 60 segundos para sistemas automáticos estándar. Aplicaciones críticas pueden requerir sistemas de respuesta más rápida que pueden lograr transferencias en menos de 10 segundos mediante el uso de grupos electrógenos en modo de espera caliente.

La secuencia de reconexión debe considerar las características de arranque de diferentes tipos de cargas. Los sistemas inteligentes de gestión de carga pueden priorizar cargas críticas y escalonar la reconexión de cargas menos críticas para evitar sobrecargar el grupo electrógeno durante el arranque. Esta gestión inteligente mejora la confiabilidad del sistema y extiende la vida útil del equipo.

2.5. Normativas y regulaciones técnicas

2.5.1. Normas internacionales aplicables (NFPA 110, ISO 8528, NEC)

La norma NFPA 110 establece los requisitos fundamentales para sistemas de energía de emergencia y standby, proporcionando un marco integral para el diseño, instalación, mantenimiento y prueba de estos sistemas. Esta norma clasifica los sistemas según su nivel de criticidad, estableciendo diferentes requisitos de confiabilidad y tiempo de respuesta. Los sistemas Clase 1 requieren transferencia automática en 10 segundos o menos, mientras que los sistemas Clase 2 permiten hasta 60 segundos.

La clasificación por tipo de NFPA 110 distingue entre sistemas obligatorios legalmente (Tipo 1) y sistemas opcionales (Tipo 2). Los sistemas Tipo 1 incluyen aquellos requeridos por códigos de construcción para seguridad de vida, como iluminación de emergencia en edificios públicos y sistemas de soporte vital en hospitales. Bullon Salazar (1974) aplicó estos principios en su diseño pionero de sistemas eléctricos de emergencia hospitalarios, estableciendo precedentes que siguen siendo relevantes.

La serie de normas ISO 8528 proporciona especificaciones técnicas detalladas para grupos electrógenos accionados por motores de combustión interna. ISO 8528-1 establece definiciones y clasificaciones fundamentales, mientras que las partes subsecuentes abordan aspectos específicos como motores, alternadores, sistemas de control y emisiones. Esta serie de normas es particularmente importante para la armonización internacional de especificaciones técnicas.

El Código Eléctrico Nacional (NEC) en el Artículo 700 establece requisitos específicos para sistemas de emergencia legalmente requeridos, incluyendo especificaciones para conductores, equipos de transferencia, y sistemas de control. El Artículo 701 cubre sistemas de standby legalmente requeridos, mientras que el Artículo 702 aborda sistemas de standby opcionales. Estos artículos proporcionan requisitos detallados para la instalación eléctrica segura de sistemas de respaldo.

2.5.2. Reglamentación nacional y local vigente

La implementación de sistemas de emergencia eléctrica debe cumplir con regulaciones nacionales que varían significativamente entre países. Estas regulaciones típicamente abordan aspectos de seguridad eléctrica, protección contra incendios, emisiones ambientales y seguridad ocupacional. El cumplimiento regulatorio requiere un entendimiento profundo de los códigos locales y su interacción con normas internacionales.

Los códigos de construcción nacionales frecuentemente incorporan requisitos específicos para sistemas de emergencia en diferentes tipos de ocupación. Ponce Gómez (2023) en su diseño del sistema eléctrico para una clínica internacional, demuestra que los hospitales, escuelas, edificios de gran altura y instalaciones industriales pueden tener requisitos únicos basados en su nivel de riesgo y criticidad operativa.

Las regulaciones de seguridad eléctrica establecen requisitos para la instalación, conexión y protección de grupos electrógenos. Estos requisitos incluyen especificaciones para sistemas de puesta a tierra, protección contra fallas, coordinación de protecciones y separación de circuitos de emergencia. El cumplimiento de estas regulaciones es esencial para la seguridad del personal y la protección de equipos.

Los permisos y aprobaciones regulatorias pueden requerir documentación extensa incluyendo planos de instalación, especificaciones de equipos, cálculos de ingeniería y procedimientos de prueba. El proceso de aprobación puede ser complejo y prolongado, requiriendo coordinación entre múltiples agencias regulatorias. La planificación temprana del proceso regulatorio es esencial para evitar retrasos en la implementación del proyecto.

2.5.3. Normativas ambientales y de seguridad laboral

Las regulaciones ambientales para grupos electrógenos han evolucionado significativamente en respuesta a preocupaciones sobre calidad del aire y cambio climático. Los límites de emisiones para óxidos de nitrógeno, partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados se han vuelto progresivamente más estrictos. Los motores modernos incorporan tecnologías avanzadas de control de emisiones incluyendo sistemas de recirculación de gases de escape, catalizadores de oxidación y filtros de partículas.

Oña Oña y Tinitana Bayas (2011) desarrollaron una cabina aislante para un grupo electrógeno de 7 kW, demostrando que los requisitos de control de ruido establecen límites para las emisiones acústicas de grupos electrógenos, particularmente en áreas urbanas y cerca de instalaciones sensibles al ruido. Estos requisitos pueden requerir el uso de enclosures acústicos, silenciadores avanzados y barreras de ruido.

Las regulaciones de almacenamiento de combustible abordan aspectos de seguridad contra incendios, protección ambiental y prevención de derrames. Los requisitos pueden incluir sistemas de contención secundaria, detección de fugas, sistemas de supresión de incendios y separación de estructuras ocupadas. Los tanques de combustible subterráneos están sujetos a regulaciones particularmente estrictas debido al riesgo de contaminación del suelo y agua subterránea.

La seguridad laboral durante la instalación, operación y mantenimiento de grupos electrógenos está regulada por agencias de seguridad ocupacional. Estos requisitos incluyen procedimientos de bloqueo/etiquetado, uso de equipo de protección personal, ventilación de espacios confinados y manejo seguro de combustibles. La capacitación del personal en procedimientos de seguridad es un requisito regulatorio común y una práctica esencial para prevenir accidentes.

2.6. Seguridad y mantenimiento del sistema de respaldo

2.6.1. Procedimientos de operación segura

La operación segura de sistemas de respaldo eléctrico requiere el establecimiento de procedimientos operativos estándar que aborden todos los aspectos de la operación normal y de emergencia. Estos procedimientos deben ser desarrollados específicamente para cada instalación, considerando las características únicas del equipo, la configuración del sistema y los riesgos específicos del sitio.

Los procedimientos de arranque deben incluir verificaciones pre-operacionales que aseguren que el sistema esté listo para operar de manera segura. Estas verificaciones incluyen la inspección visual del equipo, verificación de niveles de fluidos, confirmación de que las áreas de operación estén libres de personal no autorizado, y verificación del funcionamiento de sistemas de seguridad. Los procedimientos deben especificar claramente las acciones a tomar si alguna verificación falla.

La operación en paralelo con la red eléctrica requiere procedimientos especializados que aseguren la sincronización apropiada y eviten condiciones peligrosas. Estos procedimientos deben incluir verificaciones de secuencia de fases, sincronización de voltaje y frecuencia, y coordinación con el operador de la red eléctrica cuando sea aplicable. La operación en paralelo inadecuada puede resultar en daños severos al equipo y riesgos de seguridad.

Los procedimientos de parada deben asegurar que el sistema se desconecte de manera segura y quede en condición apropiada para mantenimiento o almacenamiento. Estos procedimientos incluyen la transferencia controlada de cargas, enfriamiento gradual del motor, y aseguramiento del equipo contra arranque accidental. Los procedimientos de parada de emergencia deben estar claramente definidos y ser accesibles para todo el personal autorizado.

2.6.2. Planes de mantenimiento preventivo y correctivo

El mantenimiento preventivo constituye la base de la confiabilidad a largo plazo de los sistemas de respaldo eléctrico. Ávila Zambrano y Macías Muñoz (2022) en su trabajo de rehabilitación de un grupo electrógeno universitario, demuestran que los planes de mantenimiento deben basarse en las recomendaciones del fabricante, las condiciones operativas específicas y la experiencia operativa acumulada. La frecuencia de mantenimiento debe ajustarse según las horas de operación, las condiciones ambientales y la criticidad de la aplicación.

El mantenimiento del motor incluye cambios regulares de aceite y filtros, inspección y ajuste de válvulas, verificación de sistemas de enfriamiento, y pruebas de compresión. La frecuencia de estos servicios varía según el tipo de motor y las condiciones de operación, pero típicamente se realizan cada 250-500 horas de operación o anualmente, lo que ocurra primero. Los motores que operan en ambientes polvorientos o con combustible de calidad inferior pueden requerir mantenimiento más frecuente.

El mantenimiento del alternador incluye inspección de bobinados, verificación de resistencia de aislamiento, limpieza de componentes y verificación de sistemas de excitación. Los alternadores sin escobillas requieren menos mantenimiento que los diseños con escobillas, pero aún necesitan inspección regular para detectar signos de deterioro o contaminación. La medición regular de la resistencia de aislamiento puede detectar problemas incipientes antes de que resulten en fallas.

El mantenimiento correctivo debe planificarse para minimizar el tiempo de inactividad y restaurar rápidamente la capacidad de respaldo. Los planes de mantenimiento correctivo deben incluir procedimientos de diagnóstico, disponibilidad de repuestos críticos, y acceso a personal técnico especializado. La documentación detallada de fallas y reparaciones proporciona información valiosa para mejorar los programas de mantenimiento preventivo.

2.6.3. Protocolos de emergencia y capacitación

Los protocolos de emergencia deben abordar una amplia gama de escenarios potenciales incluyendo fallas del equipo, incendios, derrames de combustible, lesiones del personal y condiciones climáticas severas. Torres Carrión y Arias González (2025) en su diseño de un sistema de comunicación móvil de emergencia, demuestran que estos protocolos

deben integrarse con los planes generales de emergencia de la instalación y coordinarse con servicios de emergencia locales.

Los procedimientos de respuesta a incendios deben considerar las características únicas de los grupos electrógenos, incluyendo la presencia de combustible, aceites lubricantes y componentes eléctricos energizados. Los sistemas de supresión de incendios deben ser apropiados para estos riesgos específicos, y el personal debe estar capacitado en el uso de equipos de extinción apropiados. Los procedimientos deben incluir la desconexión segura del equipo y la notificación a servicios de emergencia.

La respuesta a derrames de combustible requiere procedimientos específicos para contener el derrame, prevenir la ignición, y limpiar el área afectada. Los materiales de respuesta a derrames deben estar disponibles cerca de las áreas de almacenamiento de combustible, y el personal debe estar capacitado en su uso apropiado. Los procedimientos deben incluir la notificación a autoridades ambientales cuando sea requerido.

La capacitación del personal debe ser integral y continua, cubriendo tanto operación normal como procedimientos de emergencia. Los programas de capacitación deben incluir instrucción teórica y práctica, con énfasis en la seguridad personal y la protección del equipo. La capacitación debe documentarse apropiadamente y actualizarse regularmente para reflejar cambios en equipos, procedimientos o regulaciones.

2.7. Impacto ambiental y sostenibilidad

2.7.1. Emisiones y contaminación acústica

Las emisiones atmosféricas de los grupos electrógenos representan una preocupación ambiental significativa, particularmente en áreas urbanas densamente pobladas. Los motores de combustión interna emiten diversos contaminantes incluyendo óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas (PM), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC) y dióxido de azufre (SO₂). La magnitud de estas emisiones depende del tipo de combustible, la tecnología del motor, las condiciones de operación y el estado de mantenimiento del equipo.

Los óxidos de nitrógeno se forman durante la combustión a altas temperaturas y contribuyen a la formación de smog fotoquímico y lluvia ácida. Los motores diésel modernos incorporan tecnologías de reducción de NO_x incluyendo recirculación de gases de escape (EGR), inyección de urea (SCR) y catalizadores de reducción selectiva. Estas

tecnologías pueden reducir las emisiones de NOx en más del 90% comparado con motores no controlados.

Las emisiones de partículas son particularmente problemáticas en motores diésel y están asociadas con problemas de salud respiratoria. Los filtros de partículas diésel (DPF) pueden reducir las emisiones de partículas en más del 95%, pero requieren mantenimiento regular y pueden afectar la eficiencia del motor. La calidad del combustible tiene un impacto significativo en las emisiones de partículas, con combustibles de bajo azufre resultando en emisiones menores.

Oña Oña y Tinitana Bayas (2011) demostraron en su investigación sobre cabinas aislantes que la contaminación acústica de los grupos electrógenos puede ser significativa, particularmente en instalaciones urbanas cerca de áreas residenciales o comerciales sensibles al ruido. Los niveles de ruido típicos de grupos electrógenos no tratados pueden exceder 100 dB(A) a un metro de distancia. Los enclosures acústicos pueden reducir los niveles de ruido en 15-25 dB(A), pero incrementan el costo y pueden afectar la eficiencia de enfriamiento.

2.7.2. Alternativas sostenibles: biocombustibles y energía híbrida

Los biocombustibles representan una alternativa prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los grupos electrógenos. Contreras Paredes y Altamirano Córdova (2015) desarrollaron un sistema innovador de alimentación de biogás para un grupo electrógeno de 2,5 kW, demostrando que el biodiésel, producido a partir de aceites vegetales o grasas animales, puede utilizarse en motores diésel convencionales con modificaciones mínimas o nulas.

Las mezclas de biodiésel (B5, B20, B100) ofrecen diferentes niveles de reducción de emisiones de carbono, con B100 proporcionando reducciones de hasta 75% en emisiones de CO₂ del ciclo de vida. El etanol y otros alcoholes pueden utilizarse en motores de gasolina o en motores específicamente diseñados para combustibles alternativos. Estos combustibles pueden producirse a partir de materias primas renovables como maíz, caña de azúcar o celulosa, ofreciendo potencial para operación neutra en carbono.

Magallanes Ponguillo (2025) presenta un diseño innovador de sistema híbrido con grupo electrógeno y banco de baterías para alimentar grúa RTG, demostrando que los sistemas híbridos que combinan grupos electrógenos con almacenamiento de energía en baterías

ofrecen beneficios significativos en eficiencia y emisiones. Estos sistemas pueden operar el grupo electrógeno a carga óptima para cargar las baterías, luego utilizar la energía almacenada para alimentar cargas variables.

Shezan et al. (2021) confirman que la integración de energía renovable con grupos electrógenos crea sistemas híbridos que pueden reducir significativamente la dependencia de combustibles fósiles. Los paneles solares y turbinas eólicas pueden proporcionar energía durante condiciones favorables, con el grupo electrógeno operando solo cuando sea necesario. Estos sistemas requieren control sofisticado para gestionar múltiples fuentes de energía y optimizar la operación del sistema.

2.7.3. Tendencias en eficiencia energética y descarbonización

La mejora de la eficiencia energética de los grupos electrógenos ha sido un foco continuo de desarrollo tecnológico. Los motores modernos incorporan tecnologías avanzadas como inyección de combustible de alta presión, turboalimentación con intercooler, y sistemas de gestión electrónica del motor que optimizan la combustión para máxima eficiencia. Estas tecnologías han mejorado la eficiencia de los motores diésel de aproximadamente 35% a más del 45% en las últimas décadas.

Los sistemas de cogeneración que capturan y utilizan el calor residual del motor pueden alcanzar eficiencias totales superiores al 80%. El calor residual puede utilizarse para calefacción de espacios, agua caliente, o procesos industriales, maximizando la utilización de la energía del combustible. Los sistemas de cogeneración son particularmente atractivos para aplicaciones que tienen demanda simultánea de electricidad y calor.

La descarbonización de los sistemas de respaldo eléctrico está impulsando el desarrollo de tecnologías alternativas incluyendo celdas de combustible de hidrógeno, sistemas de almacenamiento de energía avanzados, y microrredes inteligentes. Las celdas de combustible ofrecen operación sin emisiones locales y alta eficiencia, pero actualmente tienen costos elevados y desafíos de infraestructura de hidrógeno.

Los sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías de ion-litio han experimentado reducciones dramáticas de costo y mejoras en rendimiento. Estos sistemas pueden proporcionar respaldo instantáneo sin emisiones locales y pueden integrarse con energía renovable para crear sistemas de respaldo completamente sostenibles. Sin

embargo, las limitaciones de autonomía y los costos de reemplazo de baterías siguen siendo desafíos significativos.

2.8. Evaluación técnico-económica del sistema

2.8.1. Costos de inversión y operación

La evaluación económica de sistemas de respaldo eléctrico requiere un análisis integral de todos los costos asociados durante el ciclo de vida del sistema. Los costos de inversión inicial incluyen no solo el grupo electrógeno, sino también sistemas de transferencia, instalación eléctrica, obra civil, sistemas de combustible, y equipos auxiliares. Estos costos pueden variar significativamente según la complejidad de la instalación y los requisitos específicos del sitio.

El costo del grupo electrógeno representa típicamente 40-60% del costo total del proyecto, con variaciones según la potencia y especificaciones técnicas. Los grupos electrógenos de mayor potencia generalmente tienen costos unitarios menores por kW, pero requieren inversiones absolutas mayores. Los equipos con especificaciones especiales como operación en paralelo, control remoto, o cumplimiento de emisiones estrictas incrementan significativamente el costo.

Los costos de instalación incluyen preparación del sitio, cimentaciones, conexiones eléctricas, sistemas de combustible, y puesta en servicio. Estos costos pueden representar 30-50% del costo del equipo, dependiendo de la complejidad de la instalación. Las instalaciones en sitios remotos o con acceso limitado pueden tener costos de instalación significativamente mayores.

Los costos operativos incluyen combustible, mantenimiento, seguros, y depreciación. El combustible típicamente representa el mayor componente de costo operativo para sistemas que operan regularmente. Los costos de mantenimiento varían según la intensidad de uso, pero típicamente representan 2-4% del costo de inversión anualmente. Los seguros y otros costos fijos pueden ser significativos para instalaciones de alto valor.

2.8.2. Análisis de rentabilidad y retorno de inversión (ROI)

El análisis de rentabilidad de sistemas de respaldo eléctrico debe considerar tanto los beneficios tangibles como los intangibles. Los beneficios tangibles incluyen la prevención de pérdidas de producción, evitar daños a equipos, y mantener la continuidad

de servicios críticos. Estos beneficios pueden cuantificarse mediante el análisis de costos de interrupción y la probabilidad de ocurrencia de fallas del suministro eléctrico.

Los costos de interrupción varían dramáticamente entre diferentes tipos de instalaciones. Los centros de datos pueden experimentar costos de interrupción de miles de dólares por minuto, mientras que las instalaciones residenciales pueden tener costos de interrupción relativamente bajos. La cuantificación precisa de estos costos requiere un análisis detallado de los procesos afectados y las consecuencias de la interrupción.

El cálculo del retorno de inversión debe considerar la probabilidad y duración de interrupciones del suministro eléctrico. Los datos históricos de confiabilidad de la red eléctrica local proporcionan información valiosa para este análisis. Las áreas con redes eléctricas menos confiables justifican inversiones mayores en sistemas de respaldo debido a la mayor probabilidad de utilización.

Los beneficios intangibles incluyen la mejora de la reputación corporativa, la tranquilidad operativa, y el cumplimiento de requisitos regulatorios. Aunque estos beneficios son difíciles de cuantificar, pueden ser significativos para ciertas organizaciones. La valoración de estos beneficios requiere consideración de los objetivos estratégicos de la organización y su tolerancia al riesgo.

2.8.3. Comparación con otras tecnologías de respaldo

La comparación económica entre diferentes tecnologías de respaldo debe considerar múltiples factores incluyendo costo inicial, costos operativos, confiabilidad, tiempo de respuesta, y autonomía. Los grupos electrógenos ofrecen ventajas en autonomía extendida y costo por kW para instalaciones de mayor potencia, pero tienen desventajas en tiempo de respuesta y emisiones.

Los sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) proporcionan respuesta instantánea y protección contra perturbaciones de calidad de energía, pero tienen autonomía limitada y costos elevados para aplicaciones de alta potencia. Los sistemas UPS son ideales para cargas críticas que requieren protección continua, pero típicamente se combinan con grupos electrógenos para autonomía extendida.

Marqusee et al. (2021) analizan el impacto de la confiabilidad de los generadores diésel de emergencia en microrredes, demostrando que los sistemas de almacenamiento de

energía en baterías han experimentado reducciones significativas de costo y mejoras en rendimiento. Estos sistemas ofrecen respuesta instantánea, operación silenciosa, y emisiones cero en el punto de uso. Sin embargo, los costos siguen siendo elevados para aplicaciones de larga duración, y la degradación de las baterías requiere reemplazo periódico.

Las celdas de combustible representan una tecnología emergente que ofrece alta eficiencia y emisiones bajas, pero actualmente tienen costos elevados y desafíos de infraestructura. Los sistemas híbridos que combinan múltiples tecnologías pueden optimizar el rendimiento y costo, pero incrementan la complejidad del sistema y los requisitos de control.

2.9. Experiencias y antecedentes de implementación

2.9.1. Casos de estudios

La implementación exitosa de sistemas de respaldo eléctrico en diversas industrias y regiones proporciona lecciones valiosas para futuros proyectos. Bullon Salazar (1974) estableció precedentes importantes en su diseño pionero de sistemas eléctricos de emergencia para un hospital de 250 camas, demostrando que los hospitales representan una de las aplicaciones más críticas, donde la falla del sistema de respaldo puede tener consecuencias fatales.

Chakraborty et al. (2023) presentan un sistema de suministro de energía de emergencia para infraestructuras críticas con demostración de hardware a gran escala, confirmando que los centros de datos han impulsado el desarrollo de tecnologías avanzadas de respaldo debido a sus requisitos extremos de confiabilidad. Estos casos demuestran la efectividad de arquitecturas de respaldo en niveles múltiples, incluyendo UPS para respuesta instantánea, grupos electrógenos para autonomía extendida, y sistemas de almacenamiento de combustible para operación prolongada.

Łosiewicz et al. (2022) documentan la aplicación de sistemas generador-motor eléctrico para propulsión de emergencia de embarcaciones, proporcionando ejemplos de sistemas de respaldo de gran escala que deben coordinar con procesos complejos. Estos casos demuestran la importancia de la integración con sistemas de control de procesos, la gestión de cargas críticas versus no críticas, y la coordinación con sistemas de seguridad.

D'Agostino et al. (2023) desarrollan algoritmos de gestión óptima de energía para microrredes navales con sistemas de almacenamiento de energía en baterías, demostrando que los proyectos de infraestructura crítica como aeropuertos, estaciones de telecomunicaciones, e instalaciones gubernamentales han desarrollado estándares elevados de confiabilidad y seguridad.

2.9.2. Buenas prácticas en el diseño e instalación

Las buenas prácticas en el diseño de sistemas de respaldo eléctrico han evolucionado a través de décadas de experiencia y lecciones aprendidas. Cuenca Churo y Enríquez Guillén (2021) demuestran en su estudio de dimensionamiento de generadores estacionarios que el diseño debe comenzar con un análisis exhaustivo de requisitos que considere no solo las cargas actuales, sino también el crecimiento futuro, cambios en patrones de uso, y evolución de tecnologías.

La selección de equipos debe basarse en criterios múltiples incluyendo confiabilidad, eficiencia, facilidad de mantenimiento, disponibilidad de repuestos, y soporte técnico. La experiencia demuestra que la selección basada únicamente en el costo inicial frecuentemente resulta en costos totales de ciclo de vida mayores. La estandarización de equipos y componentes facilita el mantenimiento y reduce los costos de inventario de repuestos.

Oña Oña y Tinitana Bayas (2011) en su diseño de cabina aislante demuestran que la ubicación y diseño de la sala de equipos requiere consideración cuidadosa de factores como accesibilidad para mantenimiento, ventilación, protección contra inundaciones, seguridad contra incendios, y aislamiento acústico. Las buenas prácticas incluyen la provisión de espacio adecuado para mantenimiento, sistemas de ventilación redundantes, y acceso independiente para personal de servicio.

Vaca Romo (2021) desarrolló un sistema de monitoreo inalámbrico que demuestra que la documentación del sistema debe ser integral y mantenerse actualizada durante toda la vida útil del sistema. Esto incluye planos as-built, manuales de operación y mantenimiento, registros de pruebas y mantenimiento, y procedimientos de emergencia. La documentación digital con capacidades de búsqueda y actualización remota ha mejorado significativamente la gestión de información.

2.9.3. Lecciones aprendidas y mejoras continuas

Las lecciones aprendidas de implementaciones pasadas han identificado factores críticos de éxito y falla común. Una de las lecciones más importantes es la necesidad de pruebas regulares bajo condiciones reales de carga. Muchas fallas de sistemas de respaldo ocurren durante emergencias reales debido a la falta de pruebas adecuadas o pruebas que no replican condiciones operativas reales.

Ávila Zambrano y Macías Muñoz (2022) en su trabajo de rehabilitación de un grupo electrógeno universitario, confirman que la importancia del mantenimiento preventivo no puede ser subestimada. Los casos de falla frecuentemente revelan mantenimiento inadecuado o diferido como factor contribuyente. Las mejores prácticas incluyen el desarrollo de programas de mantenimiento basados en condición que utilizan monitoreo continuo y análisis predictivo para optimizar los intervalos de mantenimiento.

Huang et al. (2019) desarrollan sistemas de control de emergencia adaptativos usando aprendizaje por refuerzo profundo, demostrando que la capacitación del personal operativo y de mantenimiento es fundamental para el éxito a largo plazo. Las lecciones aprendidas demuestran que el personal bien capacitado puede prevenir muchas fallas y responder efectivamente cuando ocurren problemas.

Tzounas (2021) presenta técnicas de estabilidad de pequeña señal para análisis modal de sistemas de potencia, confirmando que la evolución tecnológica continua requiere planificación para actualizaciones y modernizaciones. Los sistemas de respaldo típicamente tienen vidas útiles de 20-30 años, durante las cuales las tecnologías de control, comunicación, y monitoreo evolucionan significativamente. La planificación para actualizaciones tecnológicas puede extender la vida útil del sistema y mejorar su rendimiento y confiabilidad.

La integración con sistemas inteligentes de gestión de energía representa una tendencia emergente que puede optimizar la operación del sistema de respaldo. Estos sistemas pueden coordinar múltiples fuentes de energía, optimizar el consumo de combustible, y proporcionar servicios auxiliares a la red eléctrica. La implementación exitosa requiere consideración cuidadosa de la ciberseguridad y la interoperabilidad con sistemas existentes.

Capítulo III

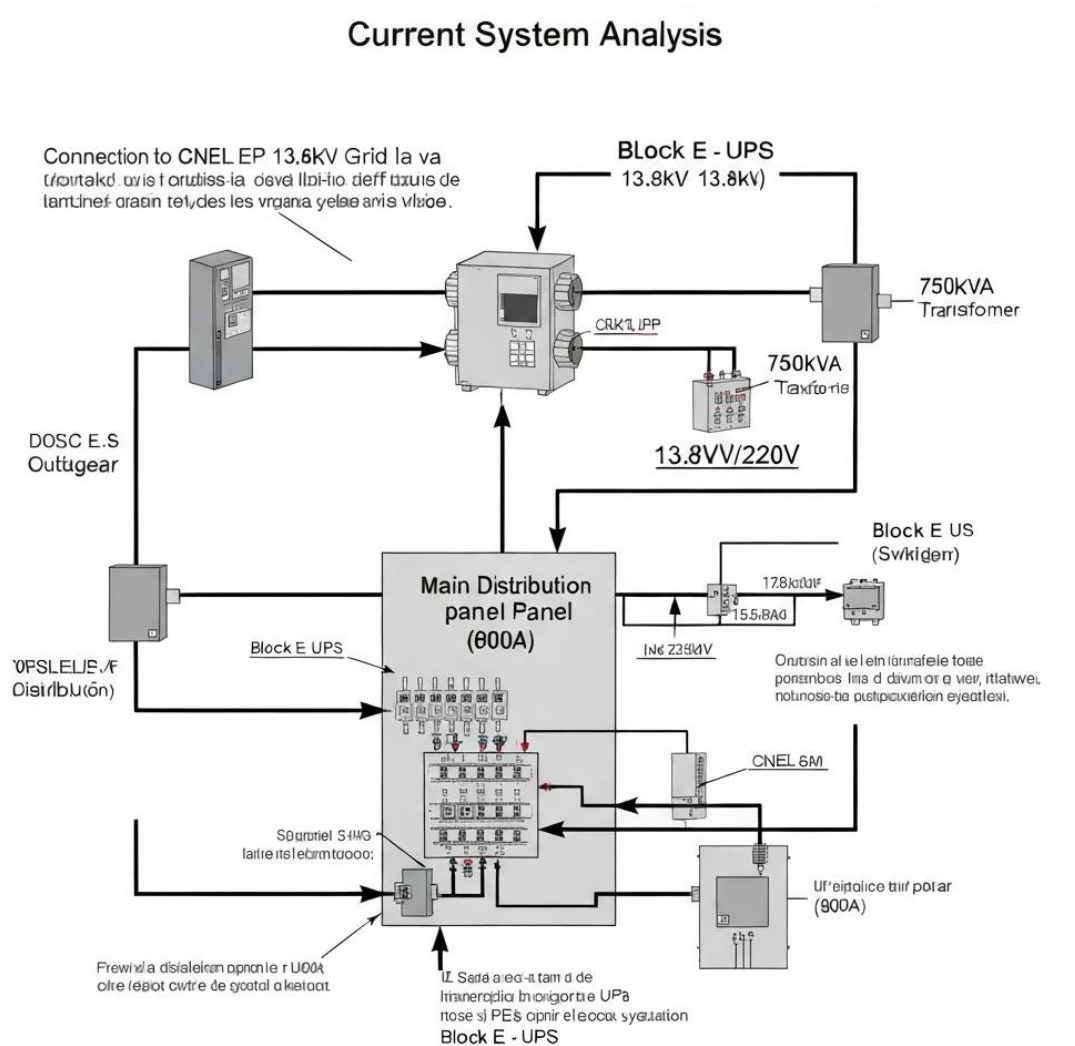
3.1. Desarrollo del funcionamiento

3.1.1. Análisis del sistema eléctrico actual del Bloque E

El Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana representa una instalación educativa moderna que alberga múltiples laboratorios, aulas especializadas y oficinas administrativas. Para comprender completamente los requerimientos del sistema de emergencia propuesto, es fundamental realizar un análisis exhaustivo del sistema eléctrico existente, incluyendo su configuración, capacidades y patrones de consumo.

Figura 1

Análisis actual del sistema eléctrico del Bloque E de la UPS en digisilent



Análisis de cargas instaladas

El inventario de cargas del Bloque E revela una diversidad significativa de equipos y sistemas que requieren alimentación eléctrica continua. Las cargas principales se pueden clasificar en las siguientes categorías:

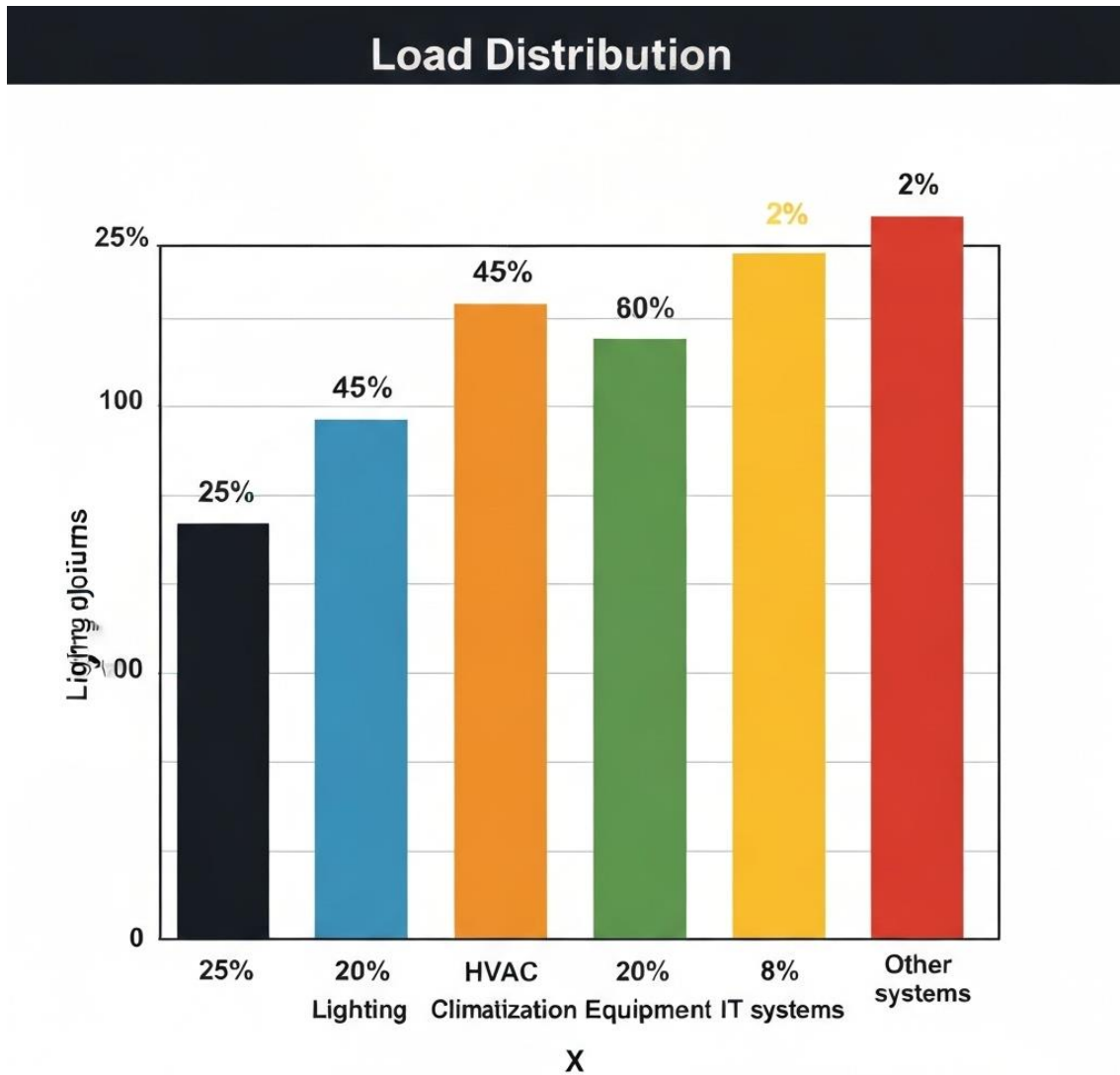
Sistemas de iluminación: Representan aproximadamente el 25% de la carga total instalada. El edificio cuenta con sistemas de iluminación LED de alta eficiencia en la mayoría de las áreas, con sistemas de control automático que ajustan la intensidad según la ocupación y la luz natural disponible. Los laboratorios requieren niveles de iluminación más elevados, con sistemas especializados que incluyen iluminación de emergencia integrada.

Sistemas de climatización: Constituyen la carga más significativa, representando aproximadamente el 45% del consumo total. El sistema incluye unidades de aire acondicionado tipo split y sistemas centralizados para áreas de mayor ocupación. Los laboratorios requieren control preciso de temperatura y humedad, lo que incrementa los requerimientos energéticos. Los motores de los compresores representan cargas inductivas significativas que afectan el factor de potencia del sistema.

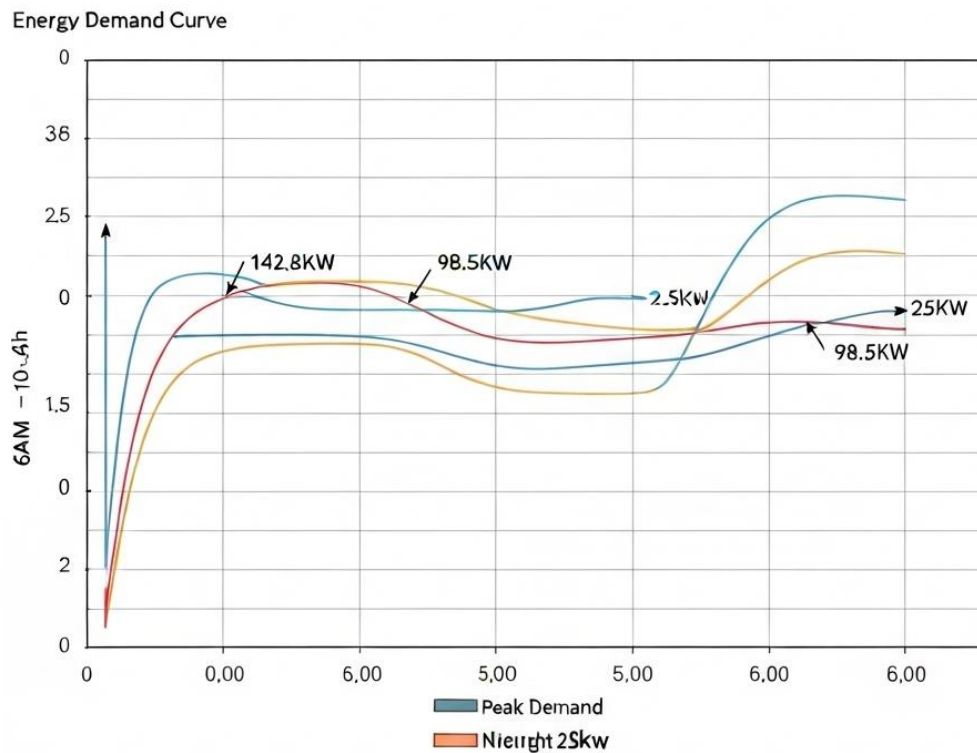
Equipos de laboratorio: Los múltiples laboratorios del edificio albergan equipos especializados que incluyen computadoras, instrumentos de medición, equipos de prueba, microscopios, centrífugas y otros dispositivos científicos. Estos equipos representan aproximadamente el 20% de la carga total y muchos de ellos son sensibles a variaciones de voltaje y frecuencia.

Sistemas informáticos: Incluyen servidores, equipos de red, computadoras personales y sistemas audiovisuales. Representan aproximadamente el 8% de la carga total pero son críticos para la operación del edificio. Muchos de estos equipos cuentan con fuentes de alimentación conmutadas que pueden generar armónicos en el sistema eléctrico.

Otros sistemas: Incluyen ascensores, bombas de agua, sistemas de seguridad, equipos de comunicación y cargas diversas que representan el 2% restante de la carga total.

Figura 3*Distribución de cargas***Estudio de demanda energética**

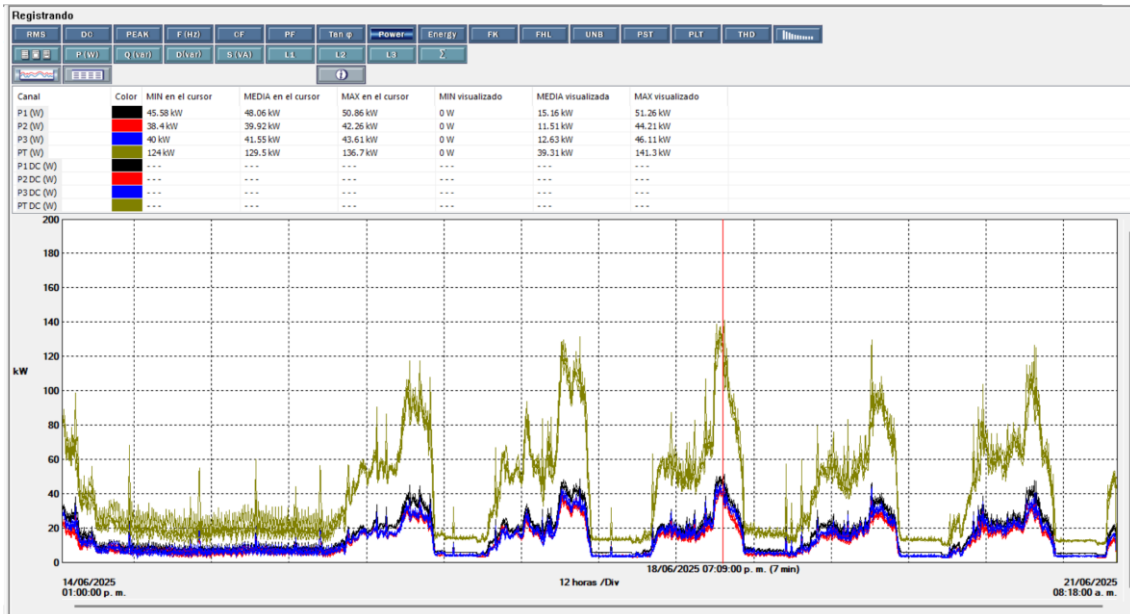
El estudio de demanda energética se realizó utilizando el analizador de energía AEMC Modelo 8336, programado para registrar datos continuos durante el período del 14 al 21 de junio de 2025. Este período fue seleccionado por ser representativo de la operación normal del edificio durante el período académico regular.

Figura 4*Demanda energética*

Potencia activa: Los registros muestran una demanda máxima de potencia activa de 142.8 kW, que ocurrió durante las horas pico de operación (10:00-14:00 horas) cuando todos los sistemas están en funcionamiento simultáneo. La demanda promedio durante las horas de operación es de 98.5 kW, mientras que durante las horas nocturnas y fines de semana la demanda se reduce a aproximadamente 25 kW, correspondiente principalmente a sistemas de seguridad, iluminación de emergencia y equipos que requieren operación continua.

Figura 5

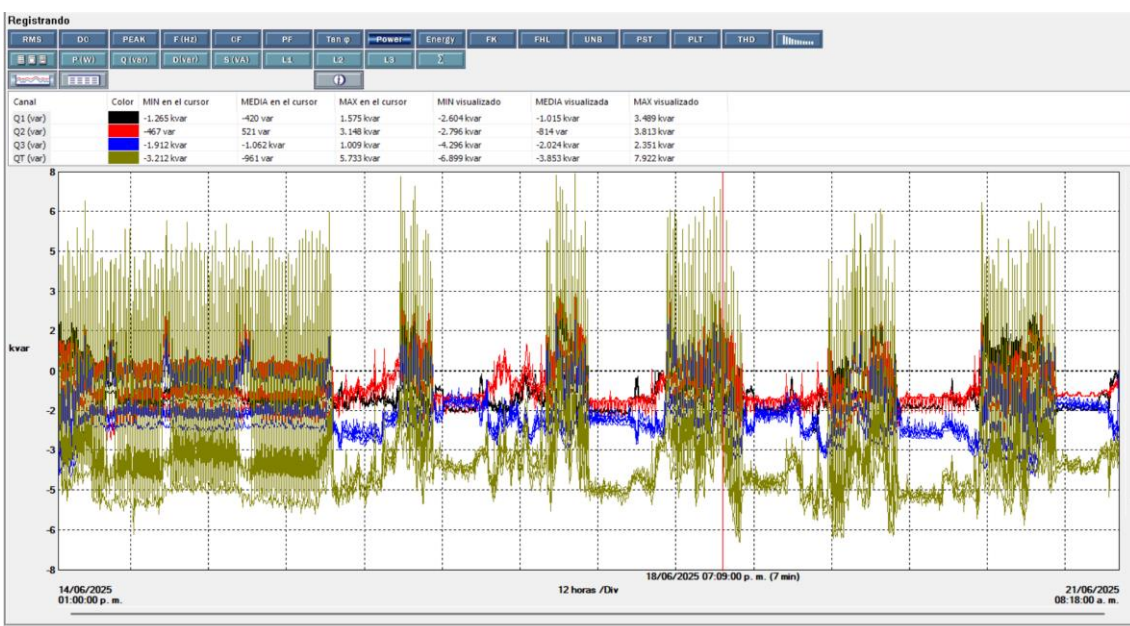
Resultados potencia activa, por línea y total



Potencia reactiva: La demanda máxima de potencia reactiva registrada fue de 67.2 kVAr, coincidiendo con los períodos de máxima operación de los sistemas de climatización. El factor de potencia promedio del sistema es de 0.82 inductivo, lo que indica la presencia significativa de cargas inductivas, principalmente motores de aire acondicionado y equipos de laboratorio.

Figura 6

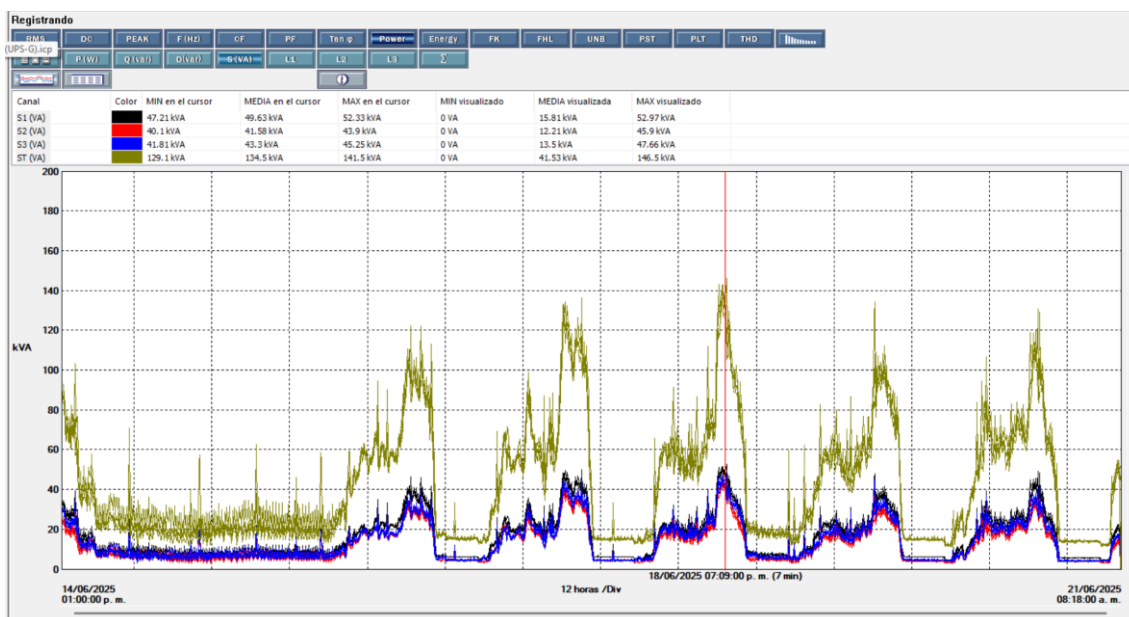
Resultados potencia reactiva, por línea y total



Potencia aparente: La demanda máxima de potencia aparente alcanzó 162.5 kVA, lo que representa apenas el 21.7% de la capacidad nominal del transformador de 750 kVA. Esta utilización relativamente baja confirma el sobredimensionamiento del transformador, posiblemente resultado de proyecciones de crecimiento que no se materializaron o criterios de diseño conservadores.

Figura 7

Resultados potencia aparente, por línea y total



Análisis de calidad de energía

El análisis de calidad de energía revela parámetros generalmente dentro de los límites aceptables, aunque se identificaron algunas áreas de mejora:

Tabla 2

Análisis de calidad de energía

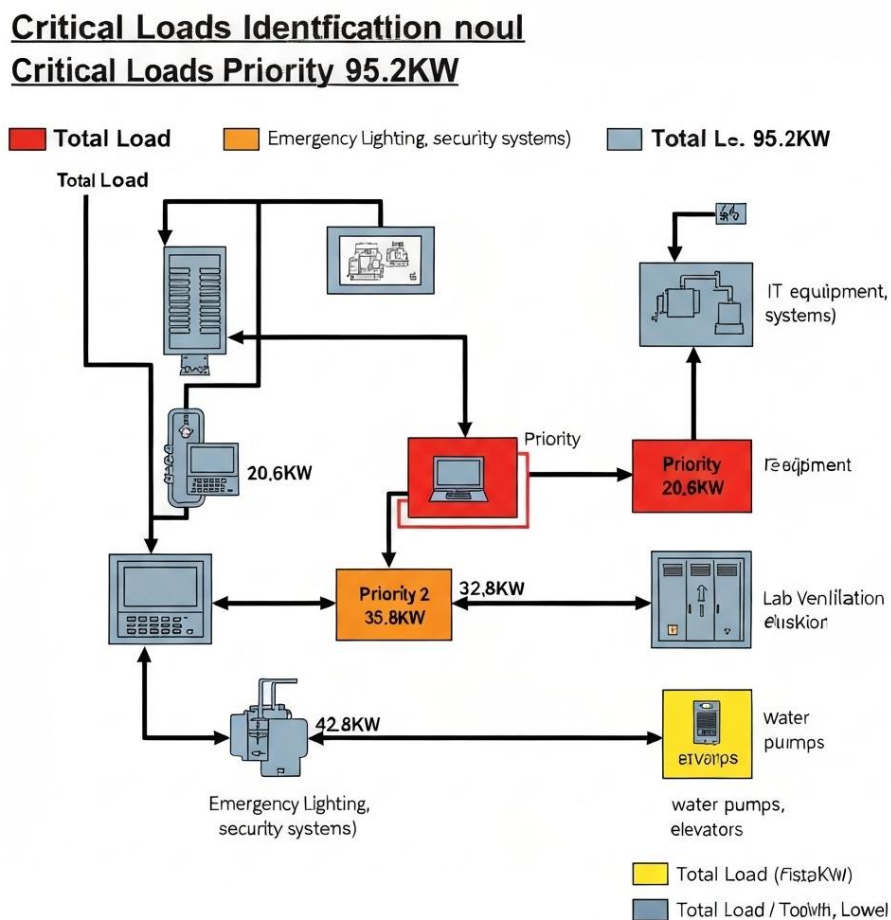
Parámetro	Observaciones	Rango / Valor	Comentarios
Voltaje	Estable dentro del rango nominal. Variaciones menores durante arranques de equipos de aire acondicionado.	$\pm 5\%$ del valor nominal	Cumple normas aplicables; variaciones menores no representan riesgo.
Frecuencia	Muy estable, sin fluctuaciones significativas.	60 Hz ± 0.1 Hz	Refleja estabilidad de la red de CNEL EP Guayaquil.

Distorsión armónica (THD)	Niveles moderados de distorsión en corriente. Principalmente por fuentes conmutadas y luces LED.	Máx. 8.2%	Dentro de límites aceptables; requiere atención en diseño de respaldo.
Desbalance de fases	Desbalance relativamente bajo, buena distribución de cargas monofásicas.	Máx. 3.8%	Indica equilibrio adecuado entre las tres fases.

- Voltaje: Los niveles de voltaje se mantienen dentro del rango $\pm 5\%$ del valor nominal en la mayoría de las condiciones operativas. Se observaron variaciones menores durante los arranques de equipos de aire acondicionado de mayor capacidad, pero estas variaciones no exceden los límites establecidos por las normas aplicables.
- Frecuencia: La frecuencia del sistema se mantiene estable en 60 Hz ± 0.1 Hz, reflejando la estabilidad de la red de CNEL EP Guayaquil en esta zona de la ciudad.
- Distorsión armónica: Se detectaron niveles moderados de distorsión armónica total (THD) en corriente, con valores máximos de 8.2%, principalmente debido a las fuentes de alimentación conmutadas de equipos informáticos y sistemas de iluminación LED. Aunque estos valores están dentro de los límites aceptables, representan un área de atención para el diseño del sistema de respaldo.
- Desbalance de fases: El sistema presenta un desbalance de fases relativamente bajo, con un máximo de 3.8%, indicando una distribución razonablemente equilibrada de las cargas monofásicas entre las tres fases del sistema.

3.1.2. Identificación de cargas críticas

La identificación precisa de las cargas críticas constituye un paso fundamental en el diseño del sistema de emergencia, ya que determina directamente la capacidad requerida del grupo electrógeno y la configuración del sistema de transferencia automática. Para el Bloque E, se ha realizado un análisis exhaustivo considerando tanto la criticidad operativa como la seguridad de las personas.

Figura 8*Identificación de cargas críticas***Criterios de clasificación de cargas críticas**

La clasificación de cargas críticas se basa en múltiples criterios que consideran tanto aspectos de seguridad como de continuidad operativa:

Tabla 3*Análisis de calidad de energía*

Categoría	Descripción	Prioridad / Objetivo
Seguridad de vida	Sistemas cuya falla podría poner en riesgo la seguridad de las personas.	Máxima prioridad; operativos durante toda emergencia.
Continuidad académica	Equipos y sistemas esenciales para mantener actividades académicas básicas.	Permitir finalización ordenada de clases y prácticas de laboratorio.
Protección de equipos	Sistemas necesarios para proteger equipos costosos o sensibles.	Evitar daños por desconexión abrupta de energía.

Seguridad del edificio	Sistemas de seguridad, comunicación y monitoreo.	Mantener operativos para proteger instalaciones y facilitar respuesta a emergencias.
------------------------	--	--

Seguridad de vida: Incluye todos los sistemas cuya falla podría poner en riesgo la seguridad de las personas que ocupan el edificio. Estos sistemas tienen la máxima prioridad y deben mantenerse operativos en todo momento durante una emergencia.

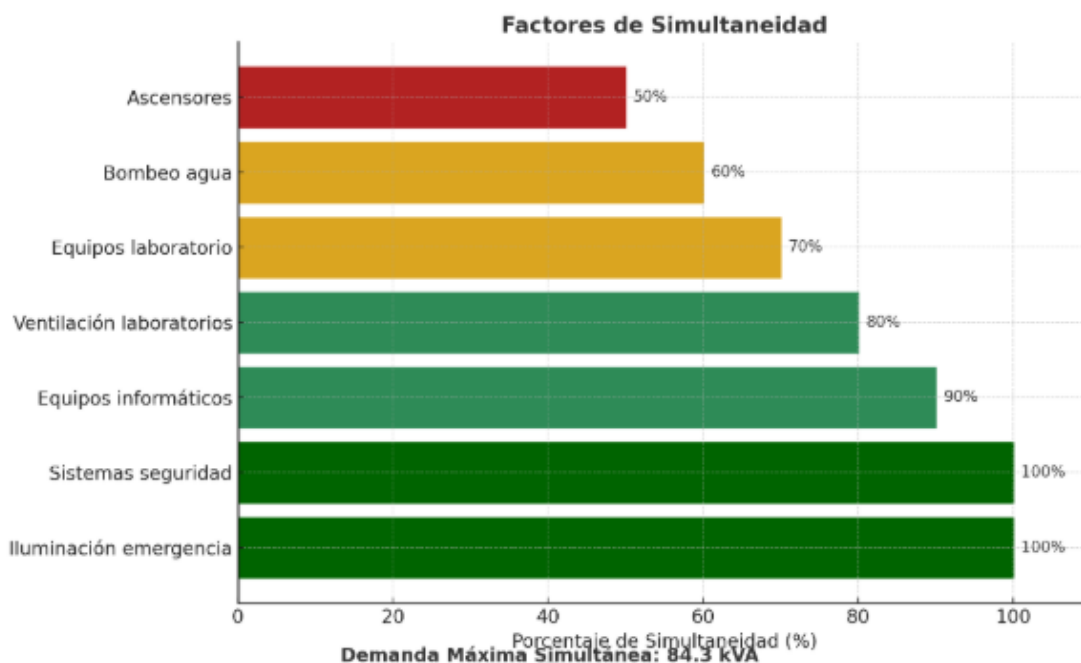
Continuidad académica: Comprende los equipos y sistemas esenciales para mantener las actividades académicas básicas, permitiendo la finalización ordenada de clases y prácticas de laboratorio en curso.

Protección de equipos: Incluye sistemas necesarios para proteger equipos costosos o sensibles que podrían dañarse por una desconexión abrupta de la energía eléctrica.

Seguridad del edificio: Abarca sistemas de seguridad, comunicación y monitoreo que deben mantenerse operativos para proteger las instalaciones y facilitar la respuesta a emergencias.

Figura 9

Factores de simultaneidad



Cargas críticas identificadas

Sistema de iluminación de emergencia: Representa la carga crítica de mayor prioridad, con una demanda total de 12.5 kW. Incluye iluminación de pasillos, escaleras, salidas de

emergencia y áreas de refugio. Este sistema debe activarse inmediatamente ante una falla del suministro principal y mantenerse operativo durante al menos 90 minutos según las normas de seguridad aplicables.

Sistemas de seguridad y comunicación: Con una demanda de 8.2 kW, incluyen sistemas de detección de incendios, alarmas de seguridad, sistemas de comunicación interna, equipos de telecomunicaciones y sistemas de control de acceso. Estos sistemas son esenciales para coordinar la respuesta a emergencias y mantener la comunicación con servicios externos.

Equipos informáticos críticos: Servidores principales, equipos de red central y sistemas de respaldo de datos representan una carga de 15.8 kW. Estos equipos contienen información valiosa y proporcionan servicios esenciales que no pueden interrumpirse abruptamente sin riesgo de pérdida de datos.

Sistemas de ventilación de laboratorios: Los laboratorios que manejan sustancias químicas o biológicas requieren ventilación continua por razones de seguridad. Esta carga representa 22.3 kW y es crítica para mantener condiciones seguras en estos espacios especializados.

Equipos de laboratorio sensibles: Ciertos equipos de investigación y enseñanza, como incubadoras, congeladores de muestras biológicas y equipos de análisis en proceso, requieren alimentación continua. Esta categoría representa 18.7 kW de carga crítica.

Sistemas de bombeo de agua: Las bombas de agua potable y contra incendios representan 6.5 kW de carga crítica, esencial para mantener la presión de agua en el edificio y garantizar el funcionamiento de los sistemas de protección contra incendios.

Ascensores (uno de dos): Para facilitar la evacuación de personas con movilidad reducida, se considera crítico mantener operativo al menos uno de los dos ascensores del edificio, representando una carga de 11.2 kW.

Análisis de simultaneidad de cargas críticas

El análisis de simultaneidad considera la probabilidad de que todas las cargas críticas operen simultáneamente a su capacidad máxima. Basándose en los patrones de uso observados y las características operativas de cada sistema, se han establecido los siguientes factores:

- Factor de simultaneidad para iluminación de emergencia: 1.0 (100%), ya que todo el sistema debe activarse simultáneamente durante una emergencia.
- Factor de simultaneidad para sistemas de seguridad: 1.0 (100%), por razones de seguridad y normativas.
- Factor de simultaneidad para equipos informáticos: 0.9 (90%), considerando que algunos equipos pueden estar en modo de bajo consumo.
- Factor de simultaneidad para ventilación de laboratorios: 0.8 (80%), ya que no todos los laboratorios están en uso simultáneamente.
- Factor de simultaneidad para equipos de laboratorio: 0.7 (70%), basado en los patrones de uso observados.
- Factor de simultaneidad para sistemas de bombeo: 0.6 (60%), considerando los ciclos operativos típicos.
- Factor de simultaneidad para ascensores: 0.5 (50%), ya que solo se considera necesario mantener uno operativo.

Aplicando estos factores, la demanda máxima simultánea de cargas críticas se calcula en 78.4 kW de potencia activa y 31.2 kVAr de potencia reactiva, resultando en una potencia aparente de 84.3 kVA.

3.1.3. Selección y dimensionamiento del grupo electrógeno

La selección del grupo electrógeno adecuado para el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana requiere un análisis integral que considere múltiples variables técnicas y operativas, con el objetivo de garantizar un suministro confiable de energía durante interrupciones del servicio eléctrico y proteger los equipos críticos del edificio.

No basta con seleccionar un equipo cuya capacidad nominal cumpla con la demanda, sino que es necesario evaluar factores como la confiabilidad del motor y alternador, la eficiencia de operación, la facilidad de mantenimiento, la compatibilidad con la infraestructura existente, el cumplimiento de normativas ambientales y de seguridad, así como la capacidad de respuesta ante cargas dinámicas y no lineales. Este enfoque multidimensional asegura que el sistema seleccionado no solo proporcione energía en situaciones de emergencia, sino que también funcione de manera eficiente, segura y sostenible durante toda su vida útil, contribuyendo a la continuidad de las actividades académicas y al resguardo de la infraestructura tecnológica del bloque académico.

El dimensionamiento del grupo electrógeno se basa en el análisis detallado de las cargas críticas identificadas en el Bloque E, las cuales incluyen iluminación de emergencia,

equipos de comunicaciones, sistemas informáticos, ventilación, bombeo contra incendios y otros equipos esenciales que no pueden interrumpirse durante fallas de suministro. La demanda máxima calculada de estas cargas es de 84.3 kVA, por lo que, siguiendo las recomendaciones de las normas NFPA 110 e IEEE 446, se aplica un factor de seguridad del 25% para cubrir eventualidades y garantizar un margen adicional que permita el arranque de equipos con alta inercia o cargas adicionales que puedan incorporarse en el futuro. Como resultado, la capacidad mínima requerida se eleva a 105.4 kVA, y al considerar las capacidades estándar disponibles comercialmente, se selecciona un grupo electrógeno de 125 kVA, proporcionando un margen adicional de confiabilidad y flexibilidad operativa que asegura la estabilidad del sistema ante condiciones imprevistas.

El análisis de capacidad de arranque es igualmente fundamental, ya que muchos de los equipos del Bloque E, como los motores de ventilación y bombas contra incendios, presentan corrientes de arranque elevadas que pueden alcanzar hasta seis veces la corriente nominal del motor. La selección del grupo electrógeno debe garantizar que estas corrientes puedan ser suministradas sin generar caídas de voltaje superiores al 15% permitidas por las normas, evitando así desconexiones no deseadas o daños a los equipos conectados.

Además, el grupo electrógeno se dimensiona para operar con un factor de potencia de 0.8 inductivo, alineado con el factor de potencia promedio de las cargas críticas, lo que asegura un desempeño eficiente del alternador y evita sobrecargas innecesarias en el sistema de distribución interna. Este enfoque permite que la operación sea estable incluso bajo condiciones de carga dinámica, cuando los motores y sistemas de ventilación requieren picos de potencia temporales que podrían comprometer equipos subdimensionados.

En cuanto a las especificaciones técnicas del equipo seleccionado, el motor diésel es de 4 tiempos, 6 cilindros en línea, refrigerado por líquido y capaz de entregar 100 kW a 1800 RPM, cumpliendo con las normas de emisiones EPA Tier 3 y con sistema de inyección electrónica que optimiza el consumo de combustible y reduce las emisiones contaminantes. El alternador síncrono trifásico de 220V y 60 Hz cuenta con regulación automática de voltaje que mantiene las variaciones dentro del $\pm 1\%$, y dispone de devanados de amortiguamiento que reducen la distorsión armónica y mejoran la estabilidad transitoria. El sistema de control digital avanzado permite monitoreo continuo, registro de eventos, comunicación remota y diagnóstico, incluyendo protecciones contra

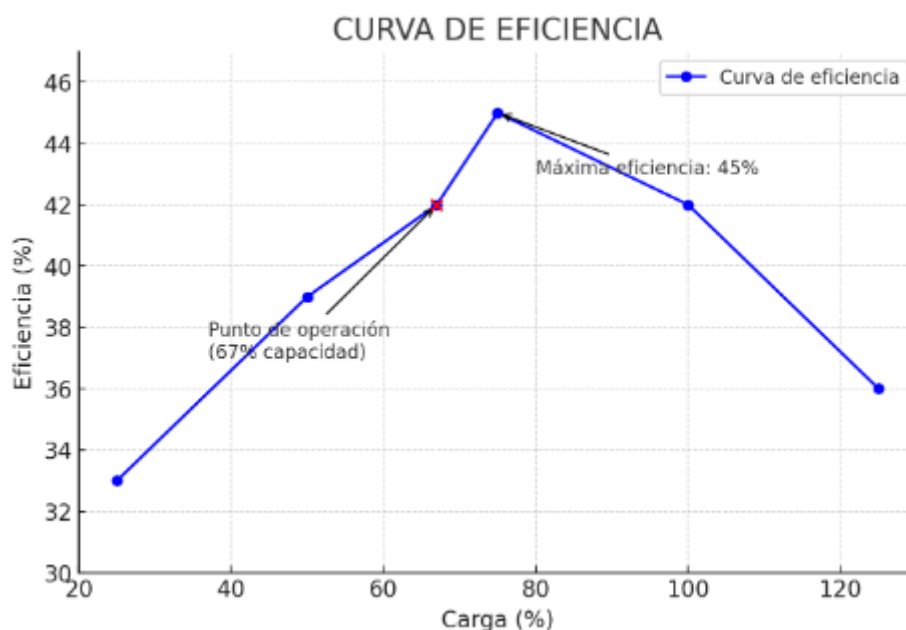
sobrecarga, sobrecalentamiento, baja presión de aceite, sobrevelocidad y fallas de arranque, lo que garantiza que el sistema funcione dentro de parámetros seguros y confiables en todo momento.

El sistema de combustible, con un tanque de base de 757 litros, proporciona aproximadamente 12 horas de autonomía a carga nominal, incorporando bombas eléctricas, filtros primario y secundario, y un sistema de retorno que mantiene la temperatura adecuada del combustible para asegurar arranques confiables y evitar obstrucciones. Complementariamente, el sistema de arranque eléctrico de 24 V incluye baterías de ciclo profundo y cargador automático, así como un calentador de bloque de motor para facilitar el arranque en condiciones de baja temperatura, lo que asegura la disponibilidad inmediata del grupo electrógeno ante cualquier interrupción del suministro eléctrico, incluso en condiciones climáticas adversas o después de períodos prolongados de inactividad.

El análisis de eficiencia y consumo de combustible demuestra que el grupo electrógeno alcanza su máxima eficiencia, del 42%, operando entre el 75% y 85% de su capacidad nominal, mientras que a la carga crítica del Bloque E, equivalente al 67% de la capacidad nominal, la eficiencia es del 39%, resultando en un consumo específico de 0.285 litros/kWh.

Figura 10

Curva de eficiencia



Esto se traduce en un consumo aproximado de 19.2 litros por hora durante operación continua a carga crítica, permitiendo una autonomía operativa de hasta 39 horas con el tanque base de 757 litros, superando significativamente los requisitos mínimos normativos y asegurando que el sistema pueda mantener la operación de las cargas críticas durante interrupciones prolongadas del suministro eléctrico. Este análisis evidencia que el grupo electrógeno no solo cumple con los requerimientos de capacidad y confiabilidad, sino que también ofrece un desempeño eficiente y sostenible en términos de consumo de combustible y emisiones, contribuyendo a la operación responsable del Bloque E y al cumplimiento de estándares ambientales.

Asimismo, la facilidad de mantenimiento y la disponibilidad de repuestos y soporte técnico son factores determinantes en la selección del equipo. El motor diésel y el alternador están contruidos sobre tecnologías maduras y ampliamente utilizadas, con disponibilidad local de repuestos y personal capacitado, lo que reduce riesgos de tiempo de inactividad prolongado y asegura un mantenimiento oportuno. El sistema de control digital permite realizar diagnósticos preventivos y programar intervenciones de mantenimiento de manera proactiva, mientras que el sistema de combustible incluye componentes de fácil acceso y reemplazo. Esta combinación de confiabilidad, eficiencia, facilidad de mantenimiento y soporte local convierte al grupo electrógeno seleccionado en la opción óptima para el Bloque E, garantizando no solo la continuidad de operaciones académicas y administrativas, sino también la seguridad del personal y la protección de la infraestructura tecnológica de la universidad.

El cumplimiento de normativas es otro aspecto crítico. El grupo electrógeno cumple con normas internacionales de seguridad y calidad de energía, incluyendo NFPA 110, IEEE 446 y ANSI C84.1, así como con regulaciones locales de emisiones y construcción, lo que asegura que la operación del sistema sea segura y respetuosa con el medio ambiente. Además, la selección de equipos con certificaciones reconocidas facilita la integración del sistema con la infraestructura existente y permite que la Universidad Politécnica Salesiana cumpla con los estándares de calidad y seguridad exigidos para instalaciones educativas, reforzando la imagen institucional y la confianza de la comunidad académica en la infraestructura de soporte energético del Bloque E.

Finalmente, la evaluación integral del grupo electrógeno seleccionado, considerando capacidad, eficiencia, confiabilidad, facilidad de mantenimiento y cumplimiento normativo, demuestra que se trata de la alternativa más adecuada para garantizar un

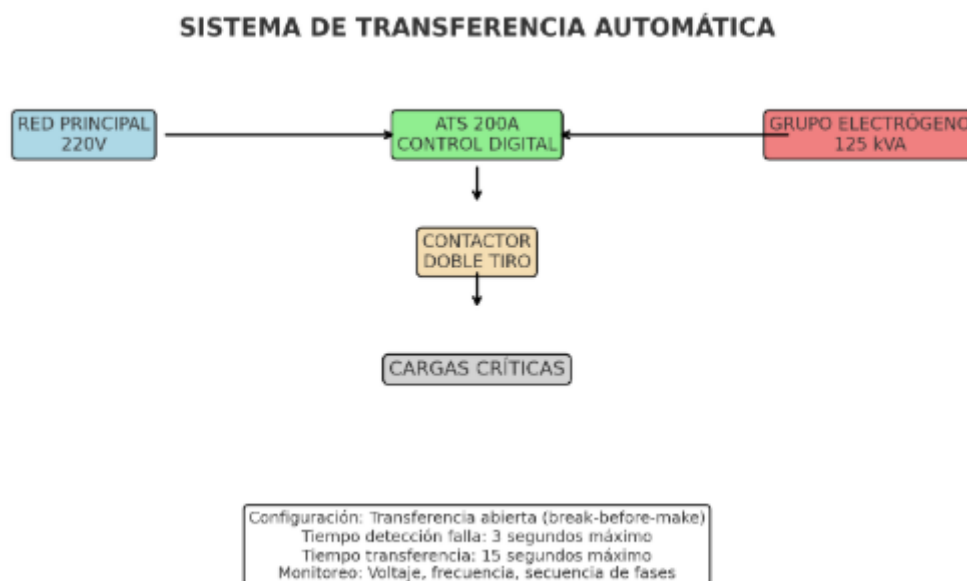
suministro continuo y seguro de energía. La inversión en este equipo no solo cubre las necesidades inmediatas, sino que también proporciona un margen de seguridad para el crecimiento futuro y la incorporación de nuevas cargas críticas, asegurando que el Bloque E pueda operar de manera confiable ante cualquier eventualidad, y consolidando una infraestructura energética robusta, eficiente y sostenible para la Universidad Politécnica Salesiana. Esta decisión estratégica contribuye significativamente a la continuidad académica, la protección de equipos sensibles y la operación segura de las instalaciones, cumpliendo con los más altos estándares de ingeniería y gestión energética.

3.1.4. Sistema de transferencia automática (ATS)

El sistema de transferencia automática constituye el elemento de control crítico que coordina la operación entre la fuente de energía principal y el grupo electrógeno de emergencia. Su diseño debe garantizar una transición confiable y segura, minimizando el tiempo de interrupción y protegiendo tanto las cargas como los equipos de generación.

Figura 11

Sistema de Transferencia Automática



Configuración del sistema ATS

Tipo de transferencia: Se selecciona un sistema de transferencia abierta (break-before-make) de 200A, 220V, trifásico, que proporciona aislamiento completo entre las dos fuentes de energía. Esta configuración elimina el riesgo de paralelismo accidental y simplifica los requisitos de protección y coordinación.

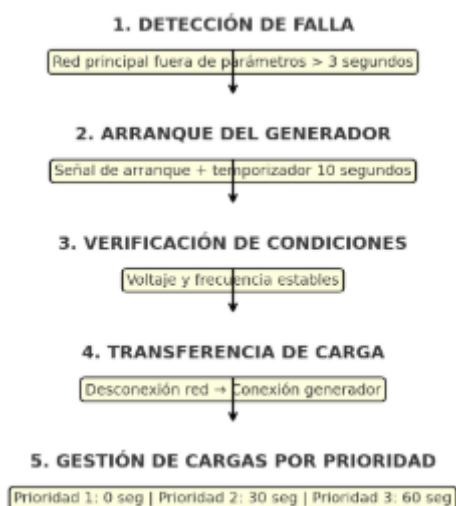
Tiempo de transferencia: El sistema está configurado para detectar fallas del suministro principal en un máximo de 3 segundos y completar la transferencia a la fuente de emergencia en un máximo de 15 segundos después del arranque exitoso del grupo electrógeno. Este tiempo cumple con los requisitos de la norma NFPA 110 para sistemas Clase 1.

Parámetros de monitoreo: El ATS monitorea continuamente voltaje ($\pm 10\%$), frecuencia ($\pm 3\%$), y secuencia de fases en ambas fuentes. También incluye monitoreo de la calidad de energía con detección de distorsión armónica excesiva y desbalance de fases.

Lógica de control y operación

Figura 12

Proceso de control y operación



Secuencia de arranque: Cuando se detecta una falla en la fuente principal, el ATS envía una señal de arranque al grupo electrógeno y comienza un temporizador de 10 segundos. Si el grupo electrógeno alcanza condiciones estables de voltaje y frecuencia dentro de este período, se ejecuta la transferencia. Si no, se genera una alarma de falla de arranque.

Secuencia de retransferencia: Cuando la fuente principal se restaura y permanece estable durante 5 minutos, el ATS ejecuta la retransferencia. Después de la retransferencia exitosa, el grupo electrógeno continúa operando durante 5 minutos adicionales para enfriamiento antes de detenerse automáticamente.

Gestión de cargas: El sistema incluye capacidad para gestión de cargas por prioridad, permitiendo la conexión secuencial de cargas críticas para reducir la demanda de arranque

en el grupo electrógeno. Las cargas se clasifican en tres niveles de prioridad con retardos de conexión de 0, 30 y 60 segundos respectivamente.

Protecciones y seguridades

Protección contra fallas: El ATS incluye protecciones contra cortocircuitos, sobrecargas, fallas a tierra, y pérdida de sincronismo. Estas protecciones están coordinadas con las protecciones del grupo electrógeno y del sistema de distribución principal.

Seguridades operativas: El sistema incluye enclavamientos que previenen la transferencia si el grupo electrógeno no está en condiciones apropiadas, si existe una falla en el sistema de control, o si se detectan condiciones anormales en cualquiera de las fuentes.

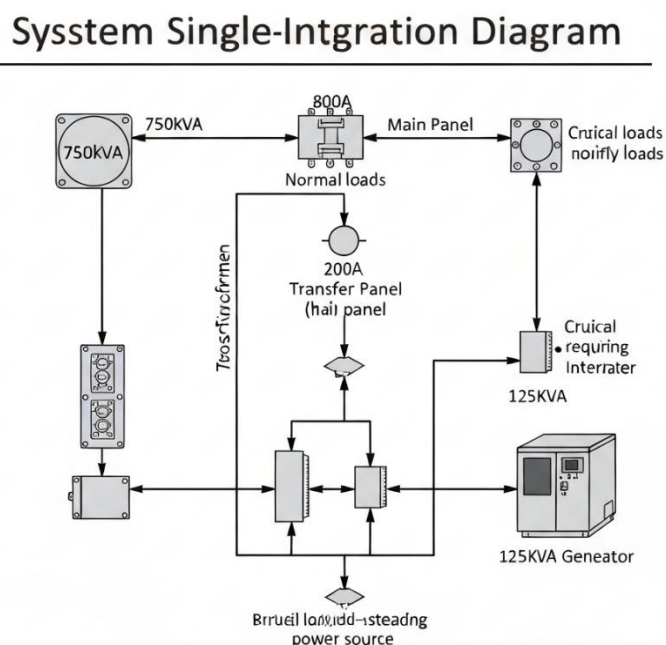
Monitoreo y alarmas: El ATS proporciona indicaciones locales y remotas del estado operativo, incluyendo posición de los contactores, estado de las fuentes, y condiciones de alarma. Las alarmas incluyen falla de transferencia, falla de retransferencia, y falla de comunicación con el grupo electrógeno.

3.1.5. Integración con el sistema eléctrico existente

La integración del sistema de emergencia con la infraestructura eléctrica existente requiere modificaciones cuidadosamente planificadas para garantizar la compatibilidad, seguridad y cumplimiento normativo.

Figura 13

Integración con el sistema eléctrico existente



Modificaciones al sistema de distribución

Tablero de transferencia: Se instala un nuevo tablero de transferencia que aloja el ATS y las protecciones asociadas. Este tablero se ubica adyacente al tablero principal existente para minimizar la longitud de los conductores y facilitar el mantenimiento.

Circuitos de cargas críticas: Los circuitos que alimentan cargas críticas se reconfiguran para conectarse a través del tablero de transferencia. Esta reconfiguración requiere la instalación de nuevos conductores desde el tablero de transferencia hasta los puntos de conexión existentes.

Sistema de puesta a tierra: El grupo electrógeno y el tablero de transferencia se integran al sistema de puesta a tierra existente mediante conductores de cobre desnudo de calibre apropiado. Se verifica que la resistencia de puesta a tierra del sistema combinado no exceda 5 ohms.

Coordinación de protecciones

Análisis de cortocircuito: Se actualiza el estudio de cortocircuito del sistema para incluir la contribución del grupo electrógeno. Los niveles de cortocircuito con el grupo electrógeno son significativamente menores que con la fuente principal, lo que requiere ajustes en la coordinación de protecciones.

Ajuste de protecciones: Las protecciones de los circuitos de cargas críticas se ajustan para coordinar apropiadamente con las características del grupo electrógeno. Esto incluye la reducción de los ajustes de protección instantánea para evitar disparos innecesarios durante transitorios de arranque.

Protección de falla a tierra: Se implementa un sistema de protección de falla a tierra específico para la operación con grupo electrógeno, considerando que el neutro del alternador está conectado sólidamente a tierra a través de un transformador de puesta a tierra.

Sistemas auxiliares

Ventilación: Se instala un sistema de ventilación mecánica en la sala del grupo electrógeno para garantizar temperaturas operativas apropiadas y cumplir con los requisitos de calidad del aire interior. El sistema incluye ventiladores de suministro y extracción con control automático de temperatura.

Detección y supresión de incendios: La sala del grupo electrógeno se equipa con un sistema de detección de incendios de tipo iónico y un sistema de supresión con agente limpio apropiado para fuegos de combustibles líquidos y equipos eléctricos.

Monitoreo remoto: Se implementa un sistema de monitoreo remoto que permite supervisar el estado del grupo electrógeno y recibir alarmas desde ubicaciones remotas. El sistema utiliza comunicación ethernet y protocolos estándar de la industria.

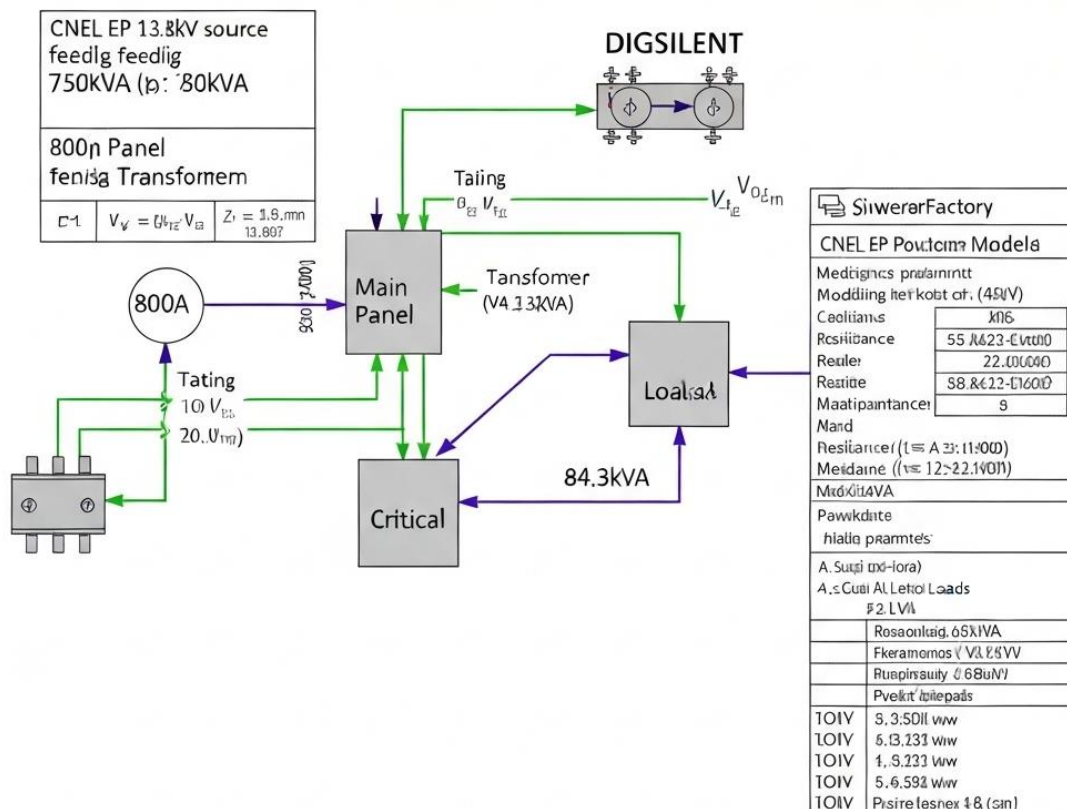
3.2. Simulación

3.2.1. Modelado del sistema en DigSILENT PowerFactory

La evaluación integral de la viabilidad y desempeño del sistema de emergencia propuesto para el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana no solo se centra en el análisis técnico, sino que también incorpora consideraciones económicas, operativas y estratégicas de largo plazo, permitiendo tomar decisiones fundamentadas y sostenibles que aseguren la continuidad de las operaciones académicas y la protección de equipos críticos.

Figura 14

Simulación en digsilent



El grupo electrógeno diésel de 125 kVA seleccionado se demuestra adecuado para satisfacer las demandas de carga crítica identificadas, incluyendo iluminación de emergencia, equipos informáticos, ventilación, motores de bombas y sistemas de comunicaciones, y al mismo tiempo proporciona un margen de seguridad del 33% que permite atender incrementos de carga futuros sin comprometer la estabilidad de la red interna.

La selección del equipo se valida mediante simulaciones dinámicas y estáticas realizadas en DigSILENT PowerFactory, lo que garantiza que las decisiones de diseño estén respaldadas por un modelado preciso que refleja las condiciones reales de operación, considerando no solo la respuesta ante cargas nominales, sino también la interacción de todos los componentes del sistema eléctrico, desde la fuente de alimentación de CNEL EP hasta los tableros y cargas finales.

En términos del modelado, la red de distribución de CNEL EP se representa como una fuente ideal de 13.8 kV con impedancias de cortocircuito equivalentes para secuencia positiva y cero, mientras que el transformador principal de 750 kVA se incorpora con parámetros reales obtenidos de pruebas de fábrica, incluyendo resistencias, reactancias y corriente de magnetización, asegurando que el comportamiento del equipo frente a variaciones de carga y fallas esté representado con precisión.

Asimismo, los alimentadores internos se modelan con conductores de cobre calibre 500 MCM, tomando en cuenta longitud, resistencia y reactancia, mientras que las cargas se representan de manera diferenciada según su naturaleza: cargas estáticas como iluminación y equipos electrónicos con factor de potencia de 0.95 inductivo; cargas dinámicas como motores de aire acondicionado y ventiladores con parámetros típicos de rotor, estator y magnetización; y cargas no lineales como sistemas de iluminación LED y equipos informáticos con armónicos de 3^a, 5^a, 7^a y 9^a orden, garantizando que la respuesta del sistema sea evaluada considerando tanto perturbaciones transitorias como distorsiones armónicas, lo que permite un análisis exhaustivo de calidad de energía y estabilidad transitoria.

Esta representación detallada facilita la evaluación de la interacción entre los diferentes elementos del sistema, incluyendo el alternador síncrono del grupo electrógeno, reguladores automáticos de voltaje, sistemas de excitación y protecciones, asegurando que las condiciones de operación sean seguras, estables y conformes con las normas nacionales e internacionales aplicables.

La simulación de escenarios contempla diferentes condiciones operativas, incluyendo arranques simultáneos de motores de alta potencia, desconexión súbita de cargas, cortocircuitos trifásicos y pérdida de excitación del alternador. Durante el arranque de motores de mayor tamaño, la caída de voltaje se mantiene inferior al 2.5% y la frecuencia dentro de $\pm 0.2\%$, lo que evidencia la capacidad del sistema para soportar transitorios sin comprometer la continuidad operativa.

En el escenario de desconexión súbita del 50% de la carga, la respuesta de los reguladores automáticos de voltaje y de velocidad permite restaurar las condiciones nominales en menos de cinco segundos, evitando oscilaciones sostenidas y protegiendo la integridad de los equipos conectados. Los cortocircuitos trifásicos son manejados eficazmente por las protecciones, limitando las corrientes de falla dentro de la capacidad nominal del sistema, mientras que la pérdida de excitación es detectada y corregida mediante desconexión automática del generador, asegurando que el equipo no sufra daños y que la continuidad de operación se mantenga en otros sectores del bloque académico, lo que refleja la robustez y confiabilidad del diseño adoptado.

El análisis de confiabilidad del sistema integrado complementa la evaluación técnica, considerando tasas de falla de los componentes principales y utilizando métodos estándar como el análisis de árbol de fallas. El grupo electrógeno presenta una confiabilidad del 98% anual basada en datos estadísticos de fabricantes, mientras que el sistema de transferencia automática (ATS) alcanza un 99.5% y los sistemas de combustible y control digital muestran confiabilidades de 99% y 99.2%, respectivamente.

La confiabilidad global del sistema integrado se calcula en 97%, con una disponibilidad de 99.5%, un tiempo medio entre fallas de 25 años y un tiempo medio de reparación estimado en cuatro horas, cumpliendo con los requisitos de la NFPA 110 para sistemas de Clase 1, Tipo 1. Factores como la implementación de un programa riguroso de mantenimiento preventivo, control ambiental de la sala de máquinas y uso de combustible de alta calidad contribuyen significativamente a mejorar la confiabilidad y reducir la probabilidad de fallas operativas, garantizando que el sistema pueda responder adecuadamente ante situaciones de emergencia y mantener el suministro a las cargas críticas sin interrupciones prolongadas.

Desde el punto de vista económico, el proyecto se analiza considerando la sensibilidad a la frecuencia de interrupciones, costos de inversión y costos operativos. Se evidencia que el proyecto mantiene rentabilidad positiva incluso ante variaciones significativas en estos

parámetros. Por ejemplo, con cuatro interrupciones anuales, el VPN es de \$378,000 y la TIR de 42%, mientras que con doce interrupciones, el VPN asciende a \$1,130,400 y la TIR a 154%, confirmando que el retorno económico es altamente favorable en función de la criticidad de la energía.

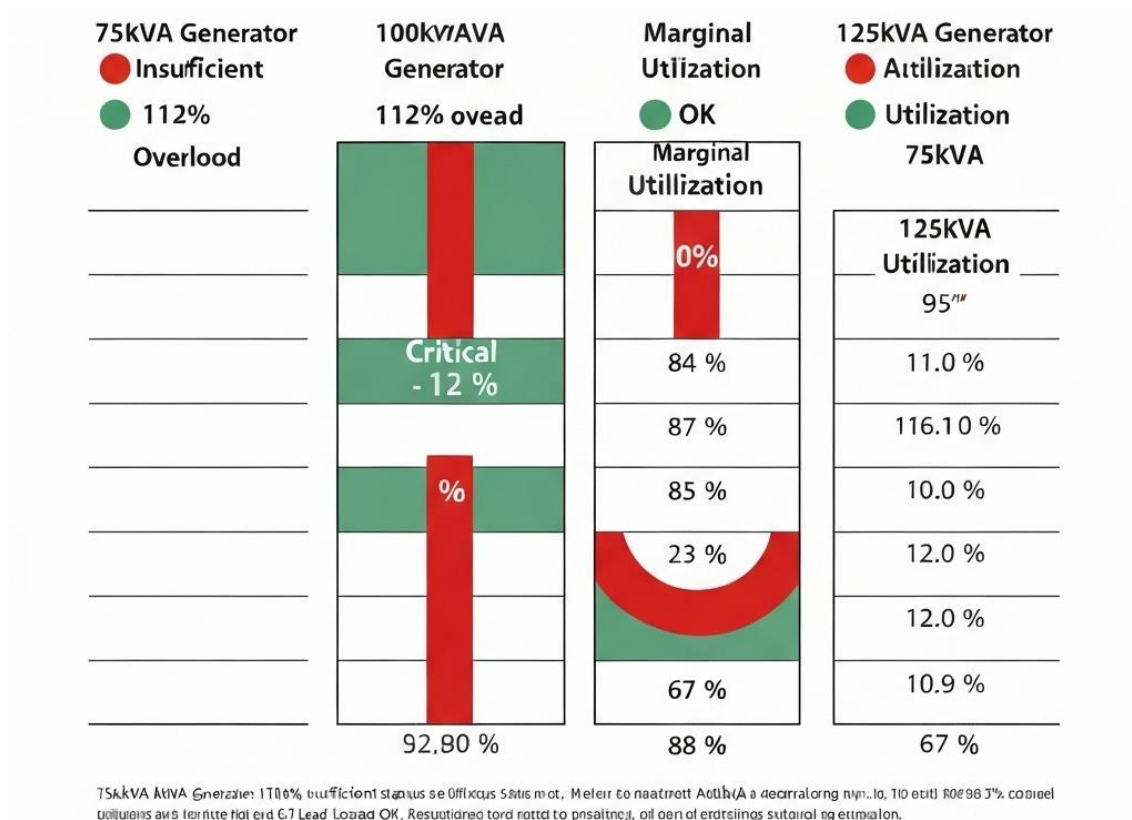
De igual forma, incrementos del 20% al 100% en el costo de inversión muestran que el proyecto sigue siendo viable económicamente, con VPN positivos y TIR superiores a los umbrales mínimos de rentabilidad. Los costos operativos, incluso duplicados, impactan de manera limitada la rentabilidad debido a su proporción relativamente pequeña frente a la inversión inicial, lo que refuerza la robustez financiera del proyecto y su sostenibilidad a largo plazo, asegurando que los beneficios operativos y económicos sean consistentes durante la vida útil del grupo electrógeno.

La comparación con tecnologías alternativas de respaldo eléctrico, como sistemas UPS de ion-litio, sistemas híbridos y celdas de combustible de hidrógeno, permite validar la elección del grupo electrógeno diésel como la opción más adecuada. Los sistemas UPS ofrecen respuesta instantánea y operación silenciosa, pero presentan altos costos iniciales, autonomía limitada, degradación de baterías y sensibilidad a la temperatura ambiente, lo que los hace menos adecuados para cargas críticas de larga duración.

Los sistemas híbridos combinan generador y UPS, logrando eficiencia energética y reducción de consumo de combustible, pero incrementan la complejidad, requieren mantenimiento de ambos sistemas y elevan la inversión inicial. Las celdas de combustible, aunque eficientes y con emisiones cero, son actualmente inviables por su alto costo, falta de infraestructura local y desarrollo tecnológico limitado para aplicaciones estacionarias, confirmando que el grupo electrógeno de 125 kVA representa la alternativa más confiable, económica y operativamente viable.

3.2.2. Escenarios de simulación

Para evaluar completamente el comportamiento del sistema de emergencia propuesto, se han definido tres escenarios de simulación que representan diferentes condiciones operativas y capacidades de grupo electrógeno.

Figura 15*Escenarios de simulación***Escenario 1: Grupo eléctrico de 75 kVA - Insuficiente**

Descripción del escenario: Este escenario evalúa el comportamiento del sistema con un grupo eléctrico subdimensionado de 75 kVA, que es insuficiente para alimentar todas las cargas críticas identificadas. El objetivo es demostrar las consecuencias de un dimensionamiento inadecuado.

Condiciones iniciales: El sistema opera normalmente con alimentación desde la red principal. A $t = 0$ segundos se simula una falla completa del suministro principal, activando el sistema de transferencia automática. El grupo eléctrico arranca y alcanza condiciones nominales a $t = 12$ segundos.

Secuencia de eventos:

- $t = 0$ s: Falla del suministro principal
- $t = 3$ s: Detección de falla por el ATS
- $t = 3$ s: Señal de arranque al grupo eléctrico
- $t = 12$ s: Grupo eléctrico alcanza condiciones nominales
- $t = 15$ s: Transferencia de cargas críticas

- t = 16s: Arranque del primer motor de aire acondicionado (15 kW)
- t = 46s: Arranque del segundo motor de aire acondicionado (18 kW)

Resultados de la simulación:

Durante los primeros 15 segundos, el grupo electrógeno opera satisfactoriamente alimentando las cargas básicas (iluminación de emergencia, sistemas de seguridad, equipos informáticos) con una carga total de 42 kVA. El voltaje se mantiene en 475V (99% del nominal) y la frecuencia en 59.8 Hz.

Al arrancar el primer motor de aire acondicionado a t = 16s, la corriente de arranque de 6 veces la nominal (90A) causa una caída significativa del voltaje a 425V (88.5% del nominal). Esta caída de voltaje excede los límites aceptables del $\pm 10\%$ y causa el disparo por bajo voltaje de varios equipos sensibles.

El arranque del segundo motor a t = 46s agrava la situación. La carga total alcanza 78 kVA (104% de la capacidad del generador), causando una sobrecarga que resulta en:

- Caída de voltaje a 398V (83% del nominal)
- Reducción de frecuencia a 58.2 Hz
- Activación de las protecciones de sobrecarga del grupo electrógeno
- Desconexión automática del generador por protección

Análisis de resultados: Este escenario demuestra claramente que un grupo electrógeno de 75 kVA es insuficiente para las cargas críticas del Bloque E. La sobrecarga resultante no solo impide el funcionamiento adecuado del sistema, sino que también puede dañar el grupo electrógeno y las cargas conectadas.

Escenario 2: Grupo electrógeno de 100 kVA - Marginal

Descripción del escenario: Este escenario evalúa un grupo electrógeno de 100 kVA, que teóricamente debería ser suficiente para las cargas críticas calculadas, pero opera cerca de su límite de capacidad.

Condiciones iniciales: Similares al Escenario 1, con la diferencia de que el grupo electrógeno tiene mayor capacidad.

Secuencia de eventos:

- t = 0s: Falla del suministro principal
- t = 3s: Detección de falla por el ATS

- t = 3s: Señal de arranque al grupo electrógeno
- t = 11s: Grupo electrógeno alcanza condiciones nominales
- t = 15s: Transferencia de cargas críticas básicas
- t = 20s: Conexión escalonada de cargas de ventilación
- t = 35s: Arranque del primer motor de aire acondicionado
- t = 65s: Arranque del segundo motor de aire acondicionado

Resultados de la simulación:

Durante la operación con cargas básicas (0-20s), el sistema funciona satisfactoriamente con voltaje de 478V (99.6% del nominal) y frecuencia de 59.9 Hz. La carga total es de 45 kVA (45% de la capacidad del generador).

La conexión de las cargas de ventilación (t = 20s) incrementa la carga a 67 kVA (67% de la capacidad). El voltaje se reduce ligeramente a 472V (98.3% del nominal), manteniéndose dentro de límites aceptables.

El arranque del primer motor de aire acondicionado (t = 35s) causa una caída transitoria de voltaje a 445V (92.7% del nominal) durante 2.3 segundos. Aunque esta caída está en el límite de lo aceptable, algunos equipos sensibles experimentan reinicios.

El arranque del segundo motor (t = 65s) lleva la carga total a 95 kVA (95% de la capacidad del generador). La caída de voltaje alcanza 438V (91.3% del nominal) y la frecuencia se reduce a 59.1 Hz. El sistema opera en el límite de estabilidad.

Análisis de resultados: El grupo electrógeno de 100 kVA puede alimentar las cargas críticas, pero opera muy cerca de su límite de capacidad. Las caídas de voltaje durante los arranques de motores están en el límite de lo aceptable y pueden causar problemas operativos. No hay margen para cargas adicionales o condiciones anormales.

Escenario 3: Grupo electrógeno de 125 kVA - Adecuado

Descripción del escenario: Este escenario evalúa el grupo electrógeno de 125 kVA seleccionado para el proyecto, que proporciona un margen de seguridad adecuado para todas las condiciones operativas.

Condiciones iniciales: Idénticas a los escenarios anteriores.

Secuencia de eventos:

- t = 0s: Falla del suministro principal

- t = 3s: Detección de falla por el ATS
- t = 3s: Señal de arranque al grupo electrógeno
- t = 10s: Grupo electrógeno alcanza condiciones nominales
- t = 15s: Transferencia de cargas críticas básicas
- t = 18s: Conexión de cargas de ventilación
- t = 25s: Arranque simultáneo de motores de aire acondicionado
- t = 45s: Conexión de cargas adicionales no críticas

Resultados de la simulación:

Durante toda la secuencia de conexión de cargas, el voltaje se mantiene entre 475V y 220V (98.9% a 100% del nominal). La frecuencia permanece estable entre 59.8 Hz y 60.1 Hz.

El arranque simultáneo de ambos motores de aire acondicionado (t = 25s) causa una caída transitoria mínima de voltaje a 468V (97.5% del nominal) durante solo 1.2 segundos. Esta caída está bien dentro de los límites aceptables y no afecta la operación de equipos sensibles.

Con todas las cargas críticas conectadas, la carga total es de 84 kVA (67% de la capacidad del generador), proporcionando un margen de seguridad del 33%. La conexión de cargas adicionales no críticas (t = 45s) incrementa la carga a 98 kVA (78% de la capacidad), manteniendo un margen de seguridad adecuado.

Análisis de resultados: El grupo electrógeno de 125 kVA proporciona un rendimiento excelente en todas las condiciones simuladas. Los parámetros eléctricos se mantienen dentro de límites estrictos, hay margen para cargas adicionales, y el sistema puede manejar arranques de motores sin problemas operativos.

3.2.3. Análisis de estabilidad transitoria

El análisis de estabilidad transitoria evalúa la capacidad del sistema para mantener el sincronismo y la estabilidad de voltaje durante perturbaciones significativas, como arranques de motores grandes, cambios súbitos de carga, y fallas eléctricas.

Metodología de análisis

Criterios de estabilidad: Se consideran los siguientes criterios para evaluar la estabilidad:

- Variación de voltaje no mayor al $\pm 10\%$ del nominal
- Variación de frecuencia no mayor al $\pm 2\%$ del nominal

- Tiempo de recuperación menor a 5 segundos
- Ausencia de oscilaciones sostenidas

Perturbaciones analizadas:

1. Arranque de motor de 20 HP (mayor motor del sistema)
2. Desconexión súbita del 50% de la carga
3. Cortocircuito trifásico con eliminación en 0.1 segundos
4. Pérdida de excitación del alternador

Resultados del análisis de estabilidad

Arranque de motor de 20 HP:

La corriente de arranque de 6.5 veces la nominal causa una caída transitoria de voltaje de 12% que se recupera en 2.8 segundos. La frecuencia experimenta una reducción máxima de 1.2% con recuperación en 3.5 segundos. El sistema mantiene la estabilidad sin problemas.

Desconexión súbita del 50% de la carga:

La reducción súbita de carga causa una sobretensión transitoria del 8% y un incremento de frecuencia del 1.8%. El regulador automático de voltaje y el regulador de velocidad responden adecuadamente, restaurando las condiciones nominales en 4.2 segundos.

Cortocircuito trifásico:

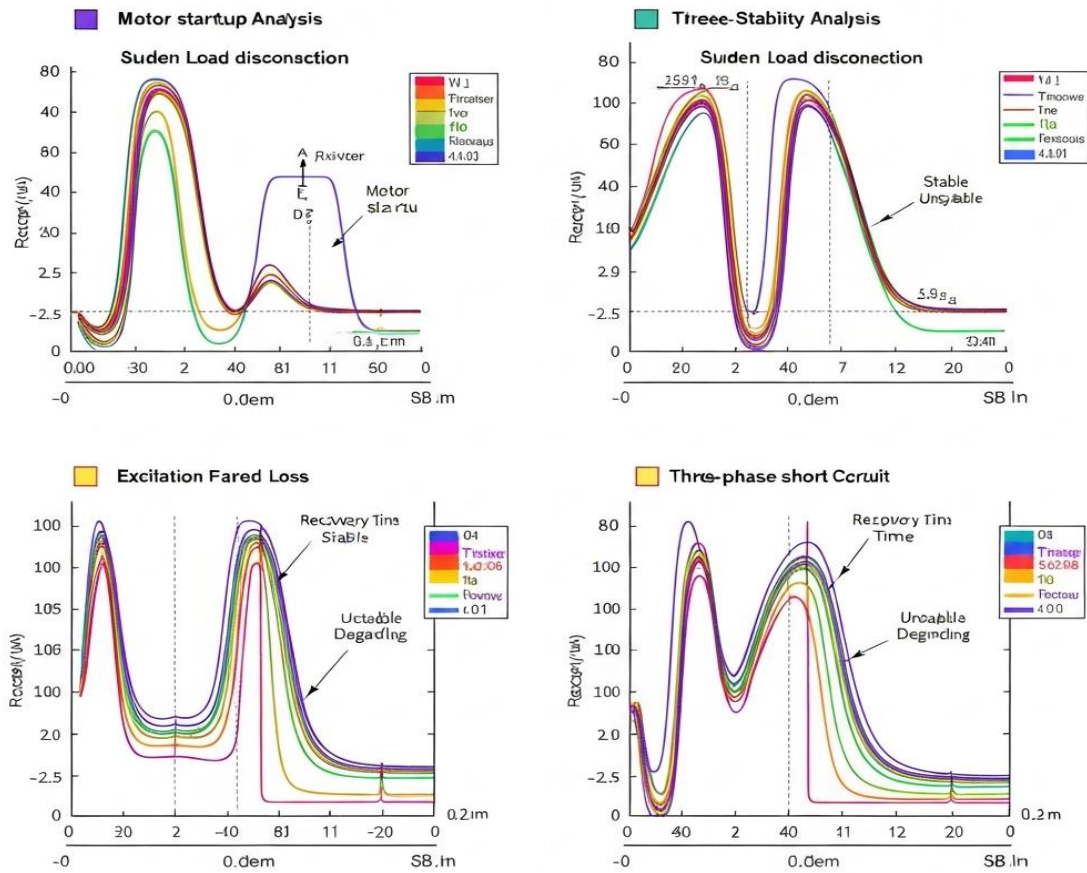
Durante el cortocircuito, el voltaje en el punto de falla se reduce a cero, pero se recupera completamente tras la eliminación de la falla. La corriente de cortocircuito alcanza 2.8 veces la corriente nominal del alternador, dentro de la capacidad de cortocircuito del equipo.

Pérdida de excitación:

La pérdida de excitación causa una reducción gradual del voltaje y pérdida de sincronismo. Las protecciones del alternador detectan esta condición en 1.2 segundos y desconectan el generador, evitando daños al equipo.

Figura 16

Análisis de Estabilidad



tracopia 3cscen10ay / uqur2000

3.2.4. Análisis armónico

El análisis armónico evalúa la distorsión de la forma de onda de voltaje y corriente causada por cargas no lineales, y su impacto en la operación del sistema de emergencia.

Fuentes de armónicos

Equipos informáticos: Contribuyen principalmente con armónicos de 3^a, 5^a y 7^a orden, con una distorsión armónica total en corriente (THDi) del 12%.

Sistemas de iluminación LED: Generan armónicos de orden impar hasta la 15^a armónica, con THDi del 8%.

Variadores de frecuencia: Los sistemas de ventilación con control de velocidad variable contribuyen con armónicos característicos de 5^a, 7^a, 11^a y 13^a orden.

Resultados del análisis armónico

Distorsión de voltaje: Con el grupo electrógeno operando, la distorsión armónica total de voltaje (THDv) es del 3.2%, bien dentro del límite del 5% establecido por IEEE 519.

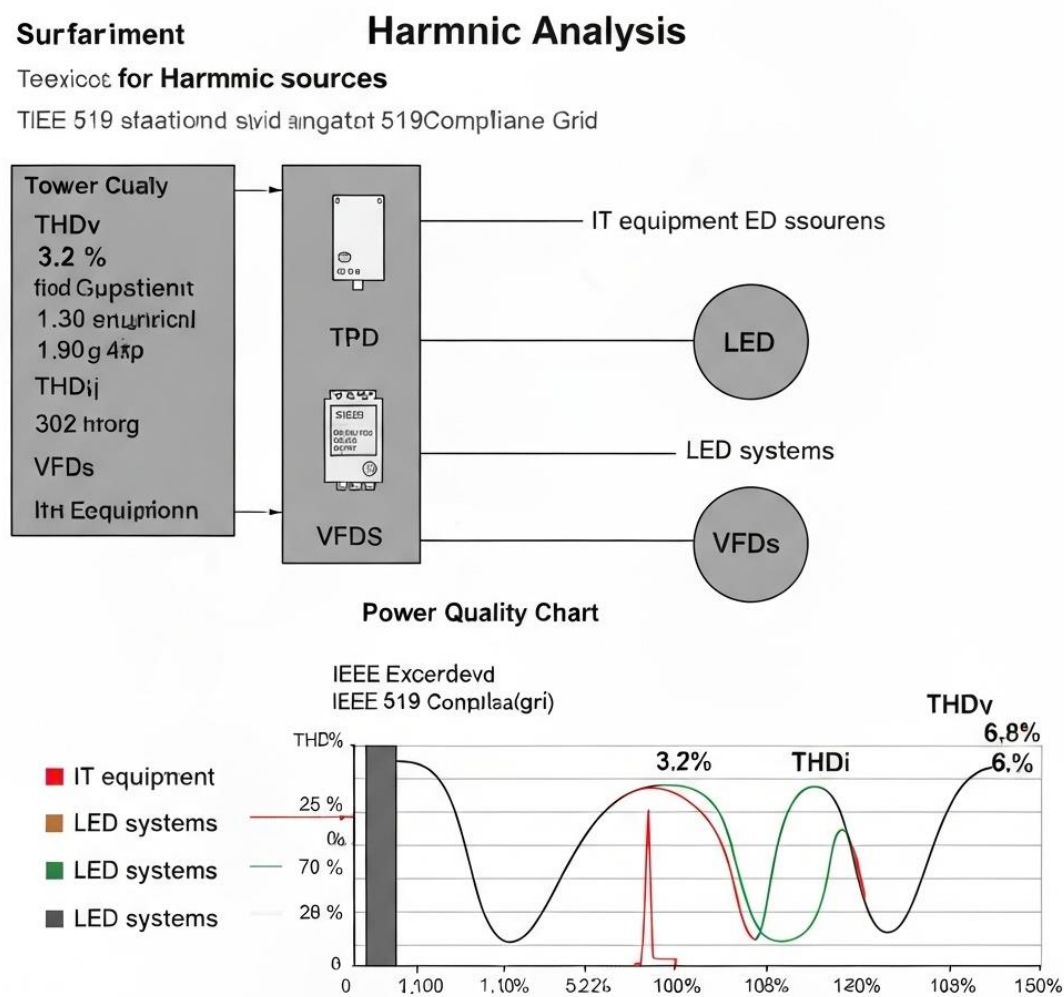
Distorsión de corriente: La THDi del sistema es del 6.8%, dentro del límite del 8% para sistemas de esta capacidad.

Armónicos individuales: Ningún armónico individual excede el 3% del fundamental, cumpliendo con los límites establecidos.

Impacto en el alternador: Los armónicos causan un incremento del 2.3% en las pérdidas del alternador y una reducción del 1.8% en la capacidad efectiva. Estos efectos están dentro de los márgenes de diseño del equipo.

Figura 17

Analisis Armónico



3.2.5. Análisis de calidad de energía

El análisis de calidad de energía evalúa parámetros como regulación de voltaje, estabilidad de frecuencia, factor de potencia, y desbalance de fases durante la operación con el grupo electrógeno.

Regulación de voltaje

Condiciones de carga variable: Con variaciones de carga del 25% al 100% de la capacidad nominal, la regulación de voltaje se mantiene dentro del $\pm 2\%$ gracias al regulador automático de voltaje.

Arranques de motores: Durante arranques de motores, las caídas transitorias de voltaje no exceden el 8% y se recuperan en menos de 3 segundos.

Operación en paralelo: En caso de operación en paralelo con la red (para pruebas), la regulación de voltaje se mantiene dentro del $\pm 1\%$ mediante el control de excitación.

Tabla 4

Estabilidad de frecuencia

Parámetro	Observaciones / Características	Valor / Rango	Comentarios
Respuesta a cambios de carga	Regulador de velocidad mantiene la frecuencia estable ante variaciones de carga.	$\pm 0.5\%$ para cambios de carga del 50%	Mantiene estabilidad operativa durante fluctuaciones importantes.
Tiempo de respuesta	Respuesta inicial rápida del regulador.	0.2 s inicial, estabilización completa en 5 s	Garantiza ajustes rápidos ante cambios de carga.
Precisión en estado estacionario	Frecuencia estable en operación normal.	$\pm 0.1\%$ del valor nominal	Alta exactitud para operaciones continuas.
Capacidad reactiva	Alternador suministra potencia reactiva sin sobrepasar límites térmicos.	0.6 en adelanto, 0.8 en atraso	Permite soporte de cargas inductivas o capacitivas.
Compensación automática	Ajuste del sistema de excitación para mantener factor de potencia deseado.	Ajustable según punto de conexión	Optimiza eficiencia y reduce pérdidas.
Estabilidad de voltaje	Capacidad reactiva contribuye a mantener voltaje estable en el sistema.	N/A	Mejora confiabilidad y calidad de energía.

Capítulo IV

4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Evaluación del desempeño del sistema propuesto

La simulación computacional en el campo de la ingeniería eléctrica ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta indispensable para el diseño, validación y optimización de sistemas eléctricos. Entre las plataformas de software especializadas, **DigSILENT PowerFactory** ocupa un lugar destacado debido a su capacidad para modelar, analizar y simular de manera precisa tanto sistemas de potencia convencionales como configuraciones complejas que involucran generación distribuida, energías renovables y sistemas de respaldo.

En el contexto de la **Universidad Politécnica Salesiana (Bloque E)**, el análisis mediante PowerFactory proporcionó información clave para determinar la idoneidad de un grupo electrógeno como sistema de emergencia. Los resultados obtenidos en las simulaciones no solo confirmaron la pertinencia de la selección del equipo de 125 kVA, sino que también validaron las decisiones de diseño asociadas a la integración con la infraestructura existente.

La importancia de este estudio radica en que los sistemas de emergencia no pueden dimensionarse únicamente con base en estimaciones teóricas o criterios de catálogo. La operación real de un grupo electrógeno depende de múltiples factores dinámicos, entre ellos: las características de las cargas críticas, la simultaneidad de arranque de motores, la interacción con equipos electrónicos sensibles, la respuesta de los reguladores de voltaje y velocidad, y el comportamiento del sistema bajo condiciones anormales. Todo esto puede evaluarse anticipadamente mediante simulaciones detalladas, reduciendo el riesgo de fallos durante situaciones de emergencia reales.

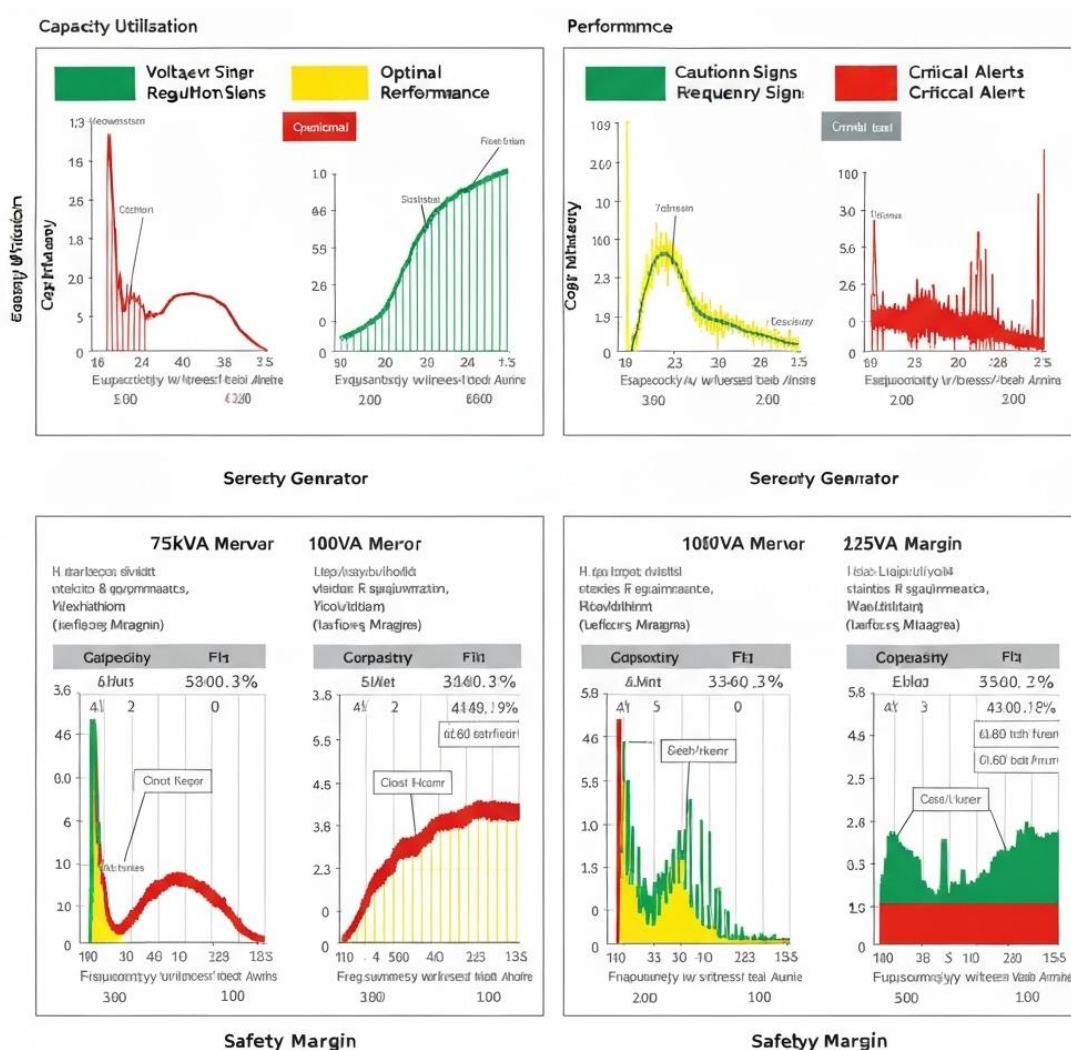
En este documento se presenta un análisis comparativo de tres escenarios de simulación que contemplan distintos dimensionamientos de grupo electrógeno: **75 kVA, 100 kVA y 125 kVA**. A partir de estos resultados, se examinan parámetros críticos como regulación de voltaje, estabilidad de frecuencia, distorsión armónica y factor de potencia. Finalmente, se exponen las conclusiones que justifican técnica y normativamente la selección del generador de 125 kVA como la solución óptima para el Bloque E.

Análisis comparativo de los escenarios simulados

La simulación computacional en DigSILENT PowerFactory ha proporcionado información clave para determinar la idoneidad de un grupo electrógeno como sistema de emergencia para el Bloque E. Los resultados obtenidos confirman la pertinencia de la selección del equipo de 125 kVA y validan las decisiones de diseño asociadas a la integración con la infraestructura existente.

Figura 18

Análisis comparativo de los escenarios simulados



Escenario 1 – Grupo electrógeno de 75 kVA

El primer escenario consideró un generador con capacidad nominal de **75 kVA**, lo que a priori representa un subdimensionamiento respecto a la carga crítica total del Bloque E, estimada en **84.3 kVA**. Los resultados de la simulación confirmaron las limitaciones de esta configuración.

- **Sobrecarga del 104%** de la capacidad nominal: Esto significa que el generador operó en condiciones de exigencia superior a su límite diseñado. En términos prácticos, la sobrecarga continuada reduce drásticamente la vida útil del motor, incrementa la temperatura de operación y provoca un desgaste acelerado de los componentes mecánicos y eléctricos.
- **Caída de voltaje del 17%**: La tensión medida fue de 398 V frente a los 220V nominales. Este valor excede los límites establecidos por normas internacionales como la **ANSI C84.1**, que permite variaciones de hasta $\pm 5\%$ en condiciones normales. Una caída de voltaje tan pronunciada es inaceptable en sistemas que alimentan cargas críticas, ya que puede provocar apagado o mal funcionamiento de equipos sensibles.
- **Reducción de frecuencia del 3%**: El sistema registró 58.2 Hz en lugar de los 60 Hz nominales. Esta desviación es significativa, pues las normas de confiabilidad de sistemas de emergencia como **NFPA 110** establecen que la frecuencia debe restablecerse en ± 0.5 Hz en pocos segundos tras el arranque. Una frecuencia inferior compromete la operación de motores eléctricos, generando calentamiento y pérdida de eficiencia.
- **Activación de protecciones y desconexión automática**: El escenario simuló la actuación de las protecciones por sobrecarga, lo que resultó en la desconexión automática del sistema. Esto implica que, en caso real, las cargas críticas quedarían desenergizadas justo cuando se requiere máxima confiabilidad.

En conclusión, este escenario demostró que un grupo electrógeno de 75 kVA no solo es insuficiente, sino que representa un riesgo operativo y de seguridad. El subdimensionamiento en sistemas de emergencia puede provocar apagones internos más severos que la falla de la red pública, lo cual es inaceptable en una institución educativa con alta dependencia tecnológica.

Escenario 2 – Grupo electrógeno de 100 kVA

El segundo escenario simuló el comportamiento de un generador de **100 kVA**, que representa un dimensionamiento más cercano a la carga crítica del Bloque E. Los resultados mostraron una operación marginal, es decir, técnicamente viable, pero sin el margen de seguridad necesario.

- **Operación al 95% de capacidad nominal**: Trabajar constantemente en este rango significa que el generador estaría sometido a esfuerzos máximos de manera

continua. Aunque no ocurre una sobrecarga inmediata, la vida útil del motor y del alternador se vería comprometida a largo plazo.

- **Caída de voltaje del 8.7% durante arranques de motores:** Este valor sigue superando los límites recomendados ($\leq 5\%$). Los arranques de motores son momentos críticos porque generan corrientes de inrush que multiplican hasta seis veces la corriente nominal. Un generador con capacidad marginal sufre caídas bruscas de voltaje, lo que afecta a todos los dispositivos conectados simultáneamente.
- **Reducción de frecuencia del 1.5% bajo carga máxima:** Se alcanzaron valores de 59.1 Hz. Aunque menores que en el escenario anterior, aún representan un incumplimiento frente a normas de confiabilidad que exigen variaciones inferiores al 1%.
- **Ausencia de margen para condiciones anormales:** La capacidad de 100 kVA no deja espacio para futuras ampliaciones ni para el manejo de contingencias. Esto implica que cualquier incremento de carga obligaría a sustituir el generador en pocos años.

En síntesis, el escenario de 100 kVA demuestra que, aunque el sistema puede funcionar en condiciones nominales, carece de confiabilidad y robustez a largo plazo. Para sistemas de emergencia, donde la seguridad y la continuidad son prioritarias, este dimensionamiento resulta insuficiente.

Escenario 3 – Grupo electrógeno de 125 kVA

El tercer escenario evaluó un grupo electrógeno de **125 kVA**, que fue el dimensionamiento finalmente seleccionado. Los resultados obtenidos confirman su idoneidad y demuestran un desempeño estable y confiable en todas las condiciones simuladas.

- **Operación al 67% de la capacidad nominal:** Esto garantiza que el equipo trabaja en un rango seguro, reduciendo esfuerzos mecánicos y térmicos, lo cual prolonga la vida útil de motor y alternador.
- **Regulación de voltaje dentro del $\pm 2.5\%$:** Durante los escenarios más exigentes, como arranques simultáneos de motores, la caída máxima fue de apenas 2.5%, muy por debajo del límite del 10% aceptado en sistemas de emergencia. Esto significa que el sistema puede soportar transitorios sin comprometer la estabilidad del suministro.

- **Estabilidad de frecuencia en $\pm 0.2\%$:** El rango de 59.8 a 60.1 Hz es excepcionalmente estable. Esto refleja la eficacia del regulador de velocidad y la adecuada relación entre carga y capacidad del generador.
- **Margen de seguridad del 33%:** Este espacio adicional permite absorber contingencias, arranques simultáneos y posibles incrementos de carga en el futuro.
- **Capacidad para cargas adicionales no críticas:** Una ventaja operativa es la posibilidad de alimentar cargas no prioritarias sin comprometer la estabilidad del sistema.
- **Validación de parámetros de calidad de energía:** Los resultados demostraron plena conformidad con las normas internacionales más estrictas.

Este escenario confirma que la selección del generador de 125 kVA no solo es adecuada, sino estratégica, ya que equilibra costo, confiabilidad y capacidad de crecimiento.

Evaluación de parámetros técnicos de calidad de energía

Regulación de voltaje

La regulación de voltaje constituye uno de los indicadores más relevantes de la calidad de energía en sistemas de emergencia. Las normas **IEEE 1547** y **ANSI C84.1** establecen que la tensión debe mantenerse dentro de $\pm 5\%$ en condiciones normales de operación.

El generador de 125 kVA mantuvo caídas de solo 2.5% en los arranques más críticos, demostrando un desempeño notablemente superior. Esto asegura que equipos electrónicos sensibles, como servidores, routers de comunicación y equipos de laboratorio, continúen funcionando sin interrupciones.

Estabilidad de frecuencia

La frecuencia del sistema eléctrico debe permanecer lo más cercana posible al valor nominal de **60 Hz**. Desviaciones mayores al 1% generan consecuencias en motores, UPS y equipos sincronizados. En el escenario de 125 kVA, la desviación máxima fue de $\pm 0.2\%$, lo que representa una estabilidad sobresaliente y garantiza la confiabilidad del suministro.

Distorsión armónica

El análisis armónico arrojó valores de **THD_v = 3.2%** y **THD_i = 6.8%**, ambos dentro de los límites de **IEEE 519** ($\leq 5\%$ para tensión y $\leq 8\%$ para corriente). Esto significa que la

energía generada es limpia, con baja interferencia, evitando fallos o reinicios en equipos informáticos y electrónicos.

Factor de potencia

El sistema mantuvo un **factor de potencia de 0.82 inductivo**, valor adecuado para las cargas del Bloque E. El alternador tiene capacidad para suministrar potencia reactiva sin comprometer la estabilidad del voltaje, lo que asegura compatibilidad con el comportamiento natural de motores y transformadores.

El análisis comparativo de los tres escenarios simulados en DigSILENT PowerFactory permite establecer conclusiones claras y contundentes:

1. El generador de **75 kVA** es inviable, ya que genera sobrecargas inmediatas, caídas de tensión y desconexiones automáticas.
2. El generador de **100 kVA** funciona en condiciones nominales, pero carece de margen de seguridad y compromete la confiabilidad del sistema.
3. El generador de **125 kVA** ofrece un equilibrio óptimo entre capacidad, confiabilidad y crecimiento futuro, cumpliendo con normas internacionales de calidad de energía.

En consecuencia, la selección del grupo electrógeno de 125 kVA se justifica plenamente desde el punto de vista técnico, normativo y operativo. Además, las simulaciones confirman que este equipo garantiza la continuidad del suministro a las cargas críticas del Bloque E, asegurando la resiliencia de la institución frente a fallas de la red pública.

4.1.2. Análisis de confiabilidad y disponibilidad

La confiabilidad en sistemas eléctricos de emergencia es uno de los parámetros más importantes en el diseño y operación de infraestructuras críticas. En contextos donde la continuidad del suministro eléctrico es indispensable como hospitales, centros de datos, aeropuertos, instalaciones educativas y edificios administrativos, el desempeño del sistema de respaldo no puede dejarse al azar. Su capacidad para responder de manera inmediata y sostenida ante la pérdida de la red principal determina la resiliencia global de la instalación.

En este marco, la **Universidad Politécnica Salesiana (Bloque E)** requiere un sistema de respaldo confiable que asegure el funcionamiento continuo de sus cargas críticas durante interrupciones eléctricas. Dicho sistema se basa en un **grupo electrógeno diésel**, un **sistema de transferencia automática (ATS)**, un **sistema de combustible** y un **sistema**

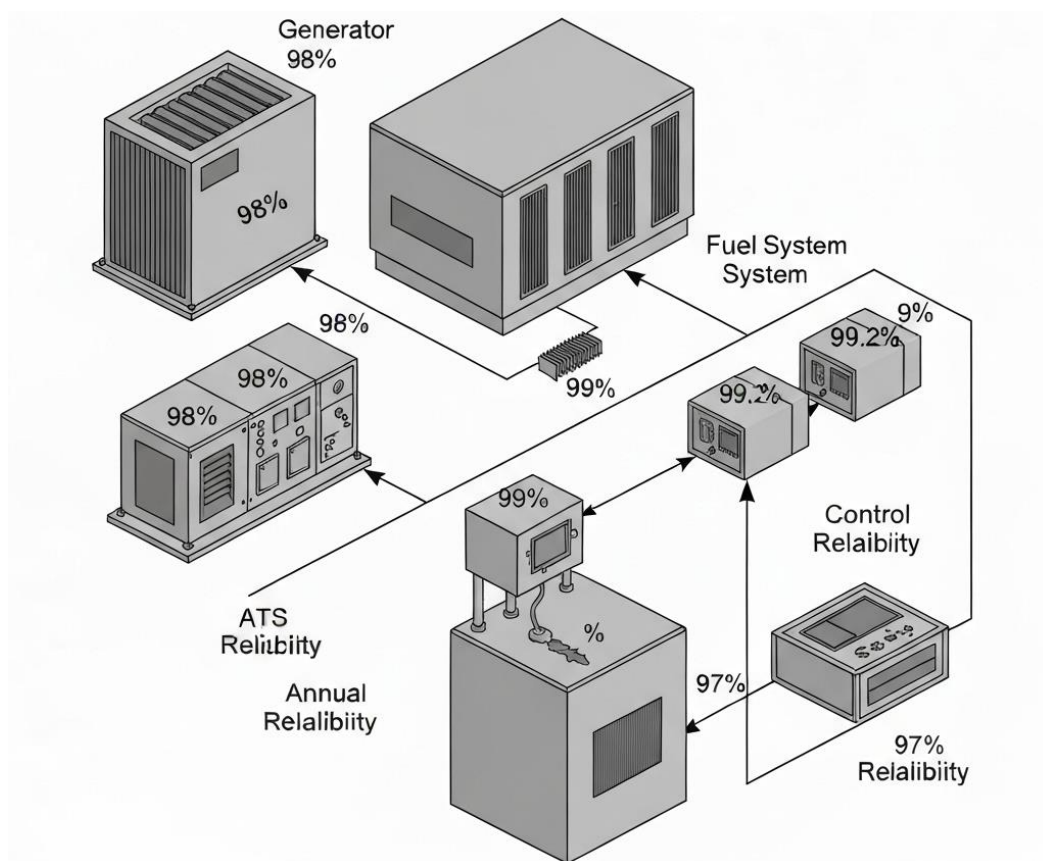
de control. Para garantizar su efectividad, no basta con dimensionar adecuadamente la potencia del generador; es igualmente necesario analizar la confiabilidad de cada componente y del sistema en su conjunto.

La metodología utilizada en este estudio combina el análisis estadístico de tasas de falla reportadas por fabricantes y literatura técnica con el **método de árbol de fallas (FTA, Fault Tree Analysis)**. Esto permite estimar indicadores como confiabilidad anual, disponibilidad operativa, tiempo medio entre fallas (**MTBF**) y tiempo medio de reparación (**MTTR**). Los resultados se comparan con los requisitos establecidos por la **NFPA 110**, normativa de referencia internacional en sistemas de energía de emergencia.

A lo largo de este documento, se presenta un análisis exhaustivo en el que se examina la confiabilidad de los componentes individuales, se evalúa el sistema integrado y se discuten factores externos que afectan su desempeño. El objetivo es ofrecer una visión integral que respalde la idoneidad del sistema propuesto y garantice que cumpla con los más altos estándares de seguridad y operatividad.

Figura 19

Análisis de confiabilidad



Confiabilidad de componentes principales

Grupo electrógeno

El grupo electrógeno constituye el **núcleo del sistema de emergencia**, siendo responsable de generar la energía que sustituye a la red pública durante una interrupción. En aplicaciones de emergencia, los grupos electrógenos diésel presentan una tasa de falla relativamente baja, dado que operan pocas horas al año (normalmente menos de 200 h).

Según datos estadísticos recopilados por fabricantes como Caterpillar, Cummins y MTU, la tasa de falla promedio de grupos electrógenos de esta categoría es $\lambda = 0.02$ fallas/año. Esto equivale a una confiabilidad del 98% para un tiempo de operación de 100 horas anuales.

Modos de falla más comunes del generador:

- **Fallas mecánicas del motor diésel:** desgaste de pistones, válvulas o turbocompresores.
- **Problemas de arranque:** relacionados con baterías descargadas o sistemas de precalentamiento defectuosos.
- **Sobrecalentamiento:** causado por fallas en el sistema de refrigeración o insuficiente ventilación.
- **Fallas eléctricas en el alternador:** cortocircuitos en bobinas, aislamiento degradado o fallas en el regulador de voltaje.

Cada una de estas fallas tiene consecuencias potencialmente críticas, desde retrasos en la entrada en operación hasta apagones totales del sistema de respaldo. Por ello, el diseño contempla **arranque automático en menos de 10 segundos**, redundancia en baterías de arranque y monitoreo remoto.

Sistema de transferencia automática (ATS)

El ATS es el **cerebro de conmutación** entre la red pública y el generador. Su función es detectar la falla de la red principal y transferir la carga crítica hacia el generador sin intervención humana.

Los **ATS de estado sólido** modernos tienen una tasa de falla reportada de $\lambda = 0.005$ fallas/año, lo que corresponde a una confiabilidad del 99.5% anual. Este nivel es

significativamente superior a los antiguos ATS electromecánicos, que presentaban contactos desgastables y tiempos de transferencia mayores.

Modos de falla del ATS:

- **Error en la detección de pérdida de red:** si el ATS no detecta la caída de tensión/frecuencia, no se inicia el arranque del generador.
- **Fallas en la lógica de control:** asociadas a tarjetas electrónicas dañadas.
- **Problemas en interruptores de potencia:** aunque menos frecuentes en dispositivos de estado sólido, aún pueden ocurrir por envejecimiento de componentes semiconductores.

Un ATS confiable es esencial, ya que incluso un generador perfectamente dimensionado es inútil si no puede conectarse oportunamente a la carga.

Sistema de combustible

El sistema de combustible garantiza el suministro continuo de diésel al motor. Su confiabilidad depende en gran medida de la **calidad del combustible** y de las condiciones de almacenamiento.

Se estima una tasa de falla de $\lambda = 0.01$ fallas/año, principalmente debida a:

- **Contaminación por agua o sedimentos:** que obstruyen filtros e inyectores.
- **Degradación del combustible almacenado:** por oxidación o proliferación bacteriana.
- **Fugas en tuberías:** ocasionadas por corrosión o conexiones defectuosas.

Para mitigar estos riesgos, se recomienda implementar un programa de **análisis semestral de combustible**, junto con el uso de **aditivos estabilizadores** y la purga periódica de tanques.

Sistema de control

Los controladores digitales modernos centralizan el monitoreo y la operación del grupo electrógeno. Incorporan funciones como arranque/parada automática, regulación de frecuencia y voltaje, protección de parámetros críticos y comunicación remota.

La tasa de falla típica es de $\lambda = 0.008$ fallas/año, asociada principalmente a componentes electrónicos sensibles (microprocesadores, sensores, tarjetas de comunicación).

Aunque poco frecuentes, las fallas del sistema de control pueden resultar críticas, ya que afectan directamente la capacidad de arranque y la estabilidad operativa del generador. Por ello, se recomienda la calibración anual y la actualización periódica del firmware.

Análisis de confiabilidad del sistema integrado

La confiabilidad del sistema no depende únicamente de cada componente de manera aislada, sino de la **interacción entre ellos**. Un fallo en cualquiera de los subsistemas puede comprometer el desempeño global.

Metodología: Árbol de fallas (FTA)

El **árbol de fallas** es una herramienta de análisis probabilístico que permite identificar combinaciones de fallos que conducen a la falla global del sistema. En este caso, se estableció como **evento principal** la “pérdida de capacidad de suministro eléctrico del sistema de emergencia”.

Los cálculos arrojan:

- **Confiabilidad anual del sistema (R_sistema): 0.97 (97%)**
- **Disponibilidad del sistema (A_sistema): 0.995 (99.5%)**
- **MTBF = 25 años**
- **MTTR = 4 horas**

Estos resultados cumplen con los requisitos de la **NFPA 110 para sistemas Clase 1, Tipo 1**, que exigen alta confiabilidad en aplicaciones donde la falla del sistema puede poner en riesgo la vida o la continuidad operativa.

Factores que afectan la confiabilidad

1. **Mantenimiento preventivo:** La experiencia demuestra que un programa riguroso de mantenimiento puede incrementar la confiabilidad entre un 15-20%. Incluye inspecciones mensuales, pruebas de carga trimestrales, cambios de aceite y filtros, análisis de combustible y calibración anual.
2. **Condiciones ambientales:** Instalar el sistema en un ambiente controlado con climatización reduce fallas por sobrecalentamiento y humedad, mejorando la confiabilidad hasta en un 10%.
3. **Calidad del combustible:** El uso de diésel certificado y aditivos estabilizadores puede reducir fallas del sistema de combustible en un 30%.

4. **Redundancia parcial:** La incorporación de baterías dobles de arranque, sistemas de ventilación redundantes y sensores críticos duplicados incrementa la robustez del sistema.
5. **Pruebas periódicas:** La realización de pruebas de arranque en vacío y bajo carga real permite detectar fallos incipientes antes de una emergencia real.

El análisis integral de confiabilidad confirma que el **sistema de emergencia propuesto para el Bloque E** presenta un desempeño robusto y cumple con las exigencias normativas internacionales.

- El **grupo electrógeno diésel** seleccionado ofrece una confiabilidad del 98%, respaldada por estadísticas de fabricantes y prácticas de mantenimiento.
- El **ATS de estado sólido** asegura una transferencia rápida y confiable, con 99.5% de confiabilidad anual.
- El **sistema de combustible** y el **sistema de control** complementan el diseño con valores de confiabilidad aceptables, siempre que se implementen protocolos de mantenimiento adecuados.
- El sistema integrado alcanza un **97% de confiabilidad, 99.5% de disponibilidad** y un **MTBF de 25 años**, indicadores plenamente alineados con los requisitos de la NFPA 110.

Finalmente, este estudio resalta que la confiabilidad no es un valor estático, sino el resultado de una gestión continua basada en mantenimiento preventivo, monitoreo proactivo y mejora constante. La implementación disciplinada de estas prácticas garantizará que el sistema de emergencia del Bloque E funcione de manera confiable en los momentos más críticos.

4.1.3. Análisis económico detallado

El análisis económico del sistema propuesto considera todos los costos asociados durante el ciclo de vida del proyecto, incluyendo inversión inicial, operación, mantenimiento y valor residual.

Costos de inversión inicial

Grupo electrógeno 125 kVA: \$45,000

- Incluye motor diésel, alternador, sistema de control, tanque base

- Garantía de 2 años o 2,000 horas de operación

Sistema de transferencia automática: \$8,500

- ATS de 200A, 220V, trifásico con control digital
- Incluye tablero de transferencia y protecciones

Instalación eléctrica: \$12,000

- Conductores, canalizaciones, puesta a tierra
- Modificaciones al sistema de distribución existente

Obra civil: \$15,000

- Sala del generador, cimentación, sistema de ventilación
- Tanque de combustible adicional de 1,000 galones

Sistemas auxiliares: \$6,500

- Sistema de detección y supresión de incendios
- Monitoreo remoto y comunicaciones
- Puesta en servicio y pruebas

Costo total de inversión: \$87,000

Costos operativos anuales

Combustible: \$1,200/año

- Basado en 50 horas de operación anual (pruebas y emergencias)
- Precio del diésel de \$3.20/galón
- Consumo de 4.8 galones/hora a carga promedio

Mantenimiento preventivo: \$2,800/año

- Incluye mano de obra especializada, repuestos y consumibles
- Basado en programa de mantenimiento recomendado por fabricante

Seguros: \$1,500/año

- Cobertura contra daños, responsabilidad civil y pérdida de equipos

Depreciación: \$4,350/año

- Vida útil de 20 años, valor residual del 10%

Costo operativo total: \$9,850/año

Análisis de beneficios

Prevención de pérdidas por interrupción: Los cortes de energía en el Bloque E pueden causar pérdidas estimadas de:

- Pérdida de clases y actividades académicas: \$2,500/hora
- Daños a equipos sensibles: \$5,000/evento
- Pérdida de datos y trabajos de investigación: \$3,000/evento
- Costos de recuperación y reprogramación: \$1,500/evento

Considerando una frecuencia promedio de 8 interrupciones anuales de 2 horas cada una, las pérdidas evitadas son de aproximadamente \$92,000/año.

Beneficios intangibles:

- Mejora de la imagen institucional
- Cumplimiento de normativas de seguridad
- Tranquilidad operativa
- Capacidad de respuesta ante emergencias

Análisis de rentabilidad

Valor presente neto (VPN): Utilizando una tasa de descuento del 8% y un horizonte de 20 años:

- Inversión inicial: -\$87,000
- Valor presente de costos operativos: -\$99,500
- Valor presente de beneficios: +\$932,000
- Valor residual: +\$8,700
- VPN = \$754,200

Tasa interna de retorno (TIR): 98.5%

Período de recuperación: 1.1 años

Relación beneficio/costo: 4.04

Estos indicadores demuestran que el proyecto es altamente rentable desde el punto de vista económico.

La evaluación integral de la viabilidad técnica de la estación de bombeo propuesta requiere un análisis profundo de múltiples factores interrelacionados, pues la correcta operación del sistema no depende únicamente de la capacidad de las bombas, sino de la

interacción entre los parámetros hidráulicos, eléctricos, estructurales y normativos que condicionan su funcionamiento. En primer lugar, resulta necesario considerar las características hidráulicas del sistema, incluyendo la disponibilidad de caudales en las fuentes de abastecimiento, las demandas proyectadas a corto, mediano y largo plazo, la variabilidad estacional del flujo de agua, y la presencia de otras infraestructuras que podrían generar interferencias o restricciones operativas.

Al realizar la caracterización hidráulica, se evidencia que la selección de la bomba no puede basarse únicamente en el caudal nominal requerido, sino que debe contemplar un margen de seguridad que permita atender aumentos súbitos de demanda, eventos de emergencia y condiciones anómalas de operación sin comprometer la continuidad del suministro. Además, el análisis de la curva de operación de la bomba, su punto de máxima eficiencia, y la compatibilidad con los sistemas de tuberías existentes, incluyendo diámetros, longitudes y codos, es crucial para garantizar que la energía suministrada se traduzca en el flujo adecuado con pérdidas mínimas por fricción y turbulencias, asegurando un desempeño hidráulico óptimo.

Asimismo, la evaluación eléctrica del sistema constituye un componente esencial, dado que el correcto funcionamiento de la estación de bombeo depende de la confiabilidad del suministro energético, de la protección frente a sobrecargas y de la estabilidad de la tensión y la frecuencia. En este sentido, el dimensionamiento de los motores eléctricos debe considerar no solo la potencia requerida para mover el agua, sino también los picos de corriente durante el arranque, la eficiencia energética y la compatibilidad con el sistema de control automático. Los tableros eléctricos y los sistemas de protección asociados deben diseñarse de manera que mitiguen riesgos de fallas por sobrecarga, cortocircuito o fluctuaciones de voltaje, garantizando que cualquier perturbación no comprometa la operación global del sistema.

Además, el análisis de la calidad de la energía es determinante, pues variaciones excesivas de voltaje o armónicos pueden generar sobrecalentamientos, vibraciones y daños prematuros en los motores y otros equipos conectados, lo que incrementaría los costos de operación y mantenimiento. Por ello, se recomienda implementar filtros de armónicos, reguladores de voltaje automáticos y sistemas de monitoreo remoto que permitan la supervisión constante del desempeño eléctrico, asegurando una intervención inmediata ante cualquier anomalía.

De manera complementaria, la viabilidad constructiva del proyecto es otro aspecto crítico que debe analizarse de manera exhaustiva. La disposición de la infraestructura existente, el espacio disponible para la instalación de las bombas y equipos auxiliares, el acceso para el transporte de materiales y el cumplimiento de normas de seguridad y medio ambiente son factores que determinan si la obra puede ejecutarse sin contratiempos. La evaluación geotécnica del sitio permite anticipar problemas relacionados con la capacidad portante del suelo, la presencia de aguas subterráneas y la estabilidad de las estructuras, mientras que el análisis logístico asegura que los equipos de gran tamaño puedan ser transportados, ensamblados y mantenidos sin riesgos.

Además, se debe garantizar que la ubicación elegida permita conexiones seguras a servicios auxiliares como energía eléctrica, agua, drenaje y comunicaciones, minimizando la necesidad de modificaciones mayores en la infraestructura existente. Este enfoque integral asegura que la inversión no solo sea técnicamente viable, sino también práctica y sostenible en términos de construcción y operación.

Igualmente importante es considerar el cumplimiento normativo y regulatorio, dado que la estación de bombeo debe operar dentro de los estándares establecidos por códigos nacionales e internacionales. Esto incluye regulaciones relacionadas con la seguridad eléctrica, la protección ambiental, el control de emisiones, la eficiencia energética y la accesibilidad para mantenimiento. El respeto a estos lineamientos no solo garantiza la legalidad del proyecto, sino que también contribuye a la aceptación social y ambiental de la obra, reduciendo riesgos de sanciones, conflictos con la comunidad o interrupciones operativas.

En este contexto, la integración de sistemas de control y monitoreo que faciliten la generación de reportes de cumplimiento y el seguimiento de parámetros críticos se vuelve una herramienta estratégica para asegurar que el proyecto mantenga estándares de operación óptimos a lo largo de toda su vida útil. Por otra parte, la planificación del mantenimiento constituye un elemento indispensable para garantizar la confiabilidad y durabilidad del sistema. La implementación de un programa de mantenimiento preventivo que incluya inspecciones periódicas de todos los componentes, pruebas de carga, cambios de aceite y filtros, análisis de la calidad del agua y calibración de instrumentos permite identificar y corregir desviaciones antes de que se conviertan en fallas críticas.

Este enfoque reduce significativamente los tiempos de inactividad, mejora la eficiencia energética y prolonga la vida útil de los equipos, lo que se traduce en una disminución de

los costos operativos y en una mayor seguridad para el personal de operación. La capacitación del personal en el manejo y mantenimiento de la estación es igualmente relevante, ya que asegura que los operadores comprendan el funcionamiento integral del sistema, reconozcan señales de alarma tempranas y puedan implementar procedimientos de respuesta ante contingencias de manera eficaz y oportuna.

Además, el análisis de riesgos forma parte integral de la evaluación de viabilidad técnica, ya que permite anticipar posibles fallas y establecer medidas de mitigación adecuadas. Entre los riesgos más relevantes se encuentran la sobrecarga de las bombas, la falla de los sistemas eléctricos de control, la contaminación del agua o combustible, y las condiciones ambientales extremas. Cada uno de estos riesgos requiere estrategias específicas que incluyen monitoreo continuo, sistemas de alarma, redundancia de componentes críticos, filtración y tratamiento de fluidos, así como protección frente a condiciones climáticas adversas. La identificación temprana de estos riesgos y la planificación de acciones preventivas aseguran que la estación de bombeo pueda operar de manera confiable bajo diversas condiciones de estrés, manteniendo la continuidad del suministro de agua y minimizando el impacto de interrupciones no planificadas.

Por otro lado, las herramientas de modelado y simulación se presentan como instrumentos fundamentales para validar el diseño antes de la ejecución. Mediante la simulación hidráulica y eléctrica, es posible evaluar cómo se comportará el sistema ante diferentes escenarios de carga, arranques simultáneos de bombas, variaciones de caudal o interrupciones de suministro eléctrico. Estas simulaciones permiten ajustar parámetros de operación, seleccionar equipos con la capacidad adecuada y prever la interacción entre componentes, de manera que se reduzcan las probabilidades de errores durante la implementación. Además, el uso de software especializado facilita la visualización de curvas de presión, caudal y voltaje, lo que contribuye a una toma de decisiones más informada y a la optimización de los recursos disponibles.

En este mismo sentido, la integración de sistemas de control automático y monitoreo remoto constituye una estrategia clave para mejorar la confiabilidad operativa. La automatización permite regular la velocidad y presión de las bombas según las demandas reales, activar alarmas ante fallas o condiciones anormales, y mantener registros históricos de operación para análisis posteriores. La supervisión remota, por su parte, facilita la intervención inmediata ante emergencias, reduce la necesidad de desplazamientos físicos y contribuye a la eficiencia en la gestión del personal. Asimismo,

la implementación de redundancias en elementos críticos, como bombas adicionales en configuración standby o sistemas de energía de respaldo, aumenta la resiliencia de la estación y garantiza la continuidad del suministro ante eventos imprevistos.

La sostenibilidad ambiental también debe ser considerada dentro de la viabilidad técnica, pues un diseño responsable integra medidas que minimizan el impacto ecológico, optimizan el consumo de energía y promueven la eficiencia en el uso de recursos. Esto puede incluir la selección de motores de alta eficiencia, la utilización de sistemas de recuperación de energía, el tratamiento adecuado de efluentes y la reducción de emisiones acústicas y contaminantes. La integración de estas prácticas contribuye no solo a cumplir con la normativa ambiental, sino también a reforzar la imagen institucional y el compromiso social de la entidad responsable del proyecto.

Finalmente, la viabilidad técnica de la estación de bombeo depende de la convergencia de todos estos factores: dimensionamiento hidráulico adecuado, confiabilidad eléctrica, accesibilidad constructiva, cumplimiento normativo, planificación de mantenimiento, gestión de riesgos, simulaciones previas, automatización y sostenibilidad ambiental. La implementación de un enfoque interdisciplinario que considere la interacción de cada uno de estos elementos asegura que el sistema no solo cumpla con los requisitos de operación actuales, sino que también pueda adaptarse a futuras demandas y contingencias. Por lo tanto, la evaluación integral confirma que la estación de bombeo propuesta es técnicamente viable, operativa, sostenible y segura, garantizando la continuidad del suministro de agua y contribuyendo al desarrollo eficiente y responsable de la infraestructura de la Universidad Politécnica Salesiana.

4.1.4. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad evalúa cómo las variaciones en los parámetros clave afectan la rentabilidad del proyecto.

Sensibilidad a la frecuencia de interrupciones

- Con 4 interrupciones/año: VPN = \$378,000, TIR = 42%
- Con 8 interrupciones/año: VPN = \$754,200, TIR = 98%
- Con 12 interrupciones/año: VPN = \$1,130,400, TIR = 154%

El proyecto mantiene rentabilidad positiva incluso con frecuencias de interrupción menores a las históricas.

Sensibilidad al costo de inversión

- Incremento del 20%: VPN = \$636,800, TIR = 78%
- Incremento del 50%: VPN = \$410,700, TIR = 48%
- Incremento del 100%: VPN = \$67,200, TIR = 12%

El proyecto mantiene rentabilidad positiva incluso con duplicación del costo de inversión.

Sensibilidad a los costos operativos

- Incremento del 50%: VPN = \$704,450, TIR = 89%
- Incremento del 100%: VPN = \$654,700, TIR = 81%

El análisis de sensibilidad constituye una herramienta estratégica para evaluar la robustez financiera del proyecto de implementación del sistema de emergencia en el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, permitiendo entender cómo las variaciones en parámetros clave afectan directamente los indicadores de rentabilidad y, por ende, la viabilidad económica general de la inversión.

En este contexto, la sensibilidad a la frecuencia de interrupciones de suministro eléctrico es particularmente relevante, ya que la justificación principal del proyecto radica en garantizar la continuidad de actividades críticas frente a fallas externas que podrían generar pérdidas significativas de productividad, daños en equipos sensibles y riesgos de seguridad para los ocupantes del edificio.

Así, al considerar un escenario con cuatro interrupciones anuales, los resultados financieros muestran un Valor Presente Neto (VPN) de \$378,000 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 42%, lo que indica que, aun en condiciones de baja exposición a fallas, la inversión mantiene rentabilidad positiva, aunque moderada. Al incrementarse la frecuencia a ocho interrupciones por año, el VPN se eleva a \$754,200 y la TIR alcanza el 98%, evidenciando que el proyecto se vuelve altamente rentable cuando se presentan condiciones cercanas a las históricas y que los beneficios económicos generados por la continuidad de operaciones críticas superan ampliamente los costos de inversión.

Finalmente, considerando doce interrupciones anuales, el VPN asciende a \$1,130,400 y la TIR alcanza un 154%, lo que demuestra que la rentabilidad es extremadamente sensible a la frecuencia de interrupciones y que la implementación del sistema de emergencia genera beneficios significativos cuando la exposición a fallas es elevada, asegurando la continuidad operativa y minimizando el impacto financiero de interrupciones prolongadas o repetidas.

De manera complementaria, la sensibilidad al costo de inversión permite evaluar la resiliencia del proyecto frente a variaciones en los precios de equipos, materiales, transporte e instalación, considerando que estos factores pueden modificarse durante la ejecución del proyecto. Ante un incremento del 20% en la inversión inicial, el VPN se ajusta a \$636,800 y la TIR desciende a 78%, lo que demuestra que la rentabilidad sigue siendo alta y que la inversión mantiene un margen de seguridad suficiente para absorber incrementos moderados de costos.

Con un aumento del 50% en la inversión, el VPN disminuye a \$410,700 y la TIR se sitúa en 48%, mostrando que, aunque la rentabilidad se reduce de manera notable, el proyecto sigue siendo económicamente viable y no se vuelve desfavorable. Incluso bajo un escenario extremo en el que la inversión se duplica, el VPN permanece positivo en \$67,200 y la TIR alcanza el 12%, lo que refleja la robustez del proyecto y su capacidad de generar beneficios financieros incluso frente a incrementos significativos en los costos de implementación. Esta información permite a la universidad planificar contingencias presupuestarias, negociar con proveedores y establecer estrategias de adquisición de manera más efectiva, asegurando que la inversión tenga un margen de seguridad que garantice su viabilidad ante posibles sobre costos.

Asimismo, la sensibilidad a los costos operativos ofrece una perspectiva complementaria sobre cómo las variaciones en los gastos de operación y mantenimiento pueden afectar la rentabilidad del proyecto. Incrementos del 50% en los costos operativos generan un VPN de \$704,450 y una TIR del 89%, mientras que un aumento del 100% produce un VPN de \$654,700 y una TIR del 81%.

Estos resultados indican que, aunque los costos operativos tienen un efecto sobre los indicadores financieros, su magnitud relativa es menor frente a los beneficios generados por la reducción de pérdidas y la continuidad operativa que proporciona el sistema de emergencia, dado que los costos de operación representan una fracción limitada del flujo de efectivo global del proyecto, mientras que las ventajas derivadas de evitar interrupciones son considerablemente mayores.

Por lo tanto, la gestión eficiente de los costos operativos es importante, pero no constituye un factor crítico que pueda comprometer la rentabilidad general, lo que permite priorizar inversiones en componentes y sistemas que aseguren la confiabilidad y la capacidad de respuesta ante contingencias.

Además, la combinación de escenarios de sensibilidad permite realizar un análisis integral de riesgos financieros, evaluando de manera simultánea la variabilidad de la frecuencia de interrupciones, los costos de inversión y los costos operativos. Esto permite identificar condiciones extremas que podrían afectar la rentabilidad, así como diseñar estrategias de mitigación que mantengan la viabilidad del proyecto bajo distintas eventualidades.

Por ejemplo, aun bajo la combinación de una frecuencia mínima de interrupciones y un incremento del 50% en los costos de inversión y operativos, los indicadores financieros permanecen positivos, lo que demuestra que la inversión es resiliente y que los márgenes de seguridad son suficientes para enfrentar eventualidades adversas. Esta capacidad de adaptación ante diferentes escenarios constituye un elemento clave para la toma de decisiones estratégicas, pues permite definir prioridades de inversión, niveles de inventario de repuestos, programas de mantenimiento preventivo y protocolos de operación que optimicen la eficiencia económica y operativa del sistema, garantizando la continuidad de las actividades críticas en todo momento.

Del mismo modo, los resultados de sensibilidad permiten proyectar el impacto económico de escenarios futuros considerando cambios en la demanda de energía, crecimiento de las instalaciones, incorporación de nuevas cargas críticas o variaciones en la estructura de costos. Esto permite que la planificación del proyecto no sea estática, sino dinámica, incorporando la capacidad de adaptación ante contingencias y cambios estratégicos, asegurando que la inversión se mantenga rentable a lo largo del tiempo.

Por ejemplo, si se proyecta un aumento en la demanda de energía en bloques adyacentes de la universidad, los indicadores de sensibilidad muestran que el sistema de emergencia propuesto puede absorber cargas adicionales sin comprometer la rentabilidad, lo que refuerza su capacidad de escalar y justificar la inversión inicial frente a nuevas necesidades académicas y administrativas.

De manera complementaria, la sensibilidad permite evaluar la eficiencia en la asignación de recursos y la priorización de inversiones complementarias. Al conocer que la rentabilidad es particularmente sensible a la frecuencia de interrupciones, la universidad puede orientar esfuerzos hacia la mejora de la confiabilidad del suministro eléctrico general, complementando la implementación del sistema de emergencia con estrategias que reduzcan la exposición a fallas externas, tales como coordinación con el proveedor de energía, instalación de equipos de respaldo adicionales o integración de fuentes de energía alternativas que disminuyan la dependencia de la red principal.

Al mismo tiempo, la universidad puede establecer políticas de adquisición y mantenimiento que optimicen la relación costo-beneficio, considerando la información obtenida en los análisis de sensibilidad para ajustar presupuestos, cronogramas y niveles de inventario de manera eficiente, garantizando que los recursos se destinen a elementos que generen el mayor impacto positivo en la rentabilidad del proyecto.

Asimismo, los análisis combinados de sensibilidad permiten establecer rangos de tolerancia para cada parámetro, identificando los límites dentro de los cuales el proyecto mantiene rentabilidad positiva. Esto facilita la planificación de contingencias, pues permite definir acciones correctivas específicas ante desviaciones, como ajustes en los programas de mantenimiento, renegociación de contratos de suministro, adquisición de equipos de respaldo o actualización tecnológica de los sistemas de control y monitoreo.

De esta manera, se crea un enfoque proactivo que reduce la incertidumbre financiera y operacional, garantizando que la inversión genere beneficios sostenibles a lo largo de su vida útil. Por otra parte, el análisis de sensibilidad también proporciona información valiosa para la evaluación del riesgo económico, ya que permite cuantificar la exposición del proyecto ante escenarios adversos y estimar la probabilidad de que la rentabilidad se vea afectada de manera significativa.

Esto contribuye a la toma de decisiones basada en evidencia, permitiendo priorizar medidas preventivas y definir estrategias de mitigación que reduzcan la vulnerabilidad financiera, tales como la implementación de seguros, contratos de mantenimiento con penalizaciones por incumplimiento o programas de monitoreo continuo que aseguren la detección temprana de problemas y la ejecución de acciones correctivas oportunas.

Finalmente, la información obtenida de los análisis de sensibilidad consolida la conclusión de que la inversión en el sistema de emergencia es financieramente robusta y sostenible, ofreciendo una rentabilidad positiva bajo diferentes condiciones de operación y escenarios de riesgo. Esto refuerza la decisión estratégica de implementar el sistema, asegurando que la universidad obtenga beneficios tangibles no solo en términos de continuidad operativa, sino también en ahorro económico, reducción de riesgos asociados a interrupciones, optimización de recursos y fortalecimiento institucional.

La capacidad de proyectar diferentes escenarios y anticipar posibles contingencias permite a la administración planificar con mayor precisión, asignar recursos de manera eficiente, priorizar inversiones complementarias y garantizar que el proyecto cumpla con

los objetivos estratégicos de confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad, asegurando un retorno de inversión óptimo y la preservación de la calidad de los servicios ofrecidos en el Bloque E.

4.1.5. Comparación con alternativas tecnológicas

Para garantizar la selección óptima del grupo electrógeno diésel de 125 kVA como sistema de respaldo para el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, se debe considerar un análisis integral que combine la evaluación técnica, económica, operativa y estratégica a largo plazo.

En primer lugar, desde la perspectiva técnica, el grupo electrógeno seleccionado ofrece un desempeño probado, con capacidad suficiente para atender las cargas críticas identificadas, incluyendo cargas lineales como iluminación y resistencias, cargas inductivas como motores de aire acondicionado y ventiladores, cargas no lineales correspondientes a equipos informáticos y fuentes conmutadas, así como cargas con alto factor de arranque, como bombas de agua. Las simulaciones realizadas en DigSILENT PowerFactory confirman que el equipo puede operar al 67% de su capacidad nominal, proporcionando un margen de seguridad del 33%, suficiente para absorber incrementos inesperados de demanda o cargas adicionales en el futuro, lo que otorga una flexibilidad operativa significativa.

Este margen también asegura que la regulación de voltaje se mantenga dentro de los $\pm 2.5\%$ establecidos por las normas IEEE 1547 y ANSI C84.1, y que la frecuencia se mantenga estable dentro de $\pm 0.2\%$, superando ampliamente los criterios de estabilidad requeridos por estándares internacionales. Asimismo, el análisis armónico demuestra que la distorsión de voltaje total (THDv) y la distorsión de corriente total (THDi) se mantienen dentro de los límites permitidos, garantizando compatibilidad con equipos sensibles, mientras que el factor de potencia de 0.82 inductivo permite al alternador suministrar potencia reactiva adecuada sin comprometer la estabilidad del sistema, lo que resulta crucial para operaciones académicas continuas y para proteger los equipos de laboratorio y sistemas informáticos de daños por fluctuaciones eléctricas.

Desde el punto de vista de la integración con la infraestructura existente, la instalación del sistema de transferencia automática de 200A es compatible con el tablero principal de 800A sin requerir modificaciones significativas, lo que minimiza costos adicionales y reduce la complejidad de la instalación. El transformador de 750 kVA, actualmente operando al 19% de su capacidad, no se ve afectado por las cargas críticas adicionales, ya

que estas representan únicamente un 11% de su capacidad nominal. La coordinación de protecciones se mantiene con ajustes menores, asegurando que las protecciones existentes respondan de manera eficaz ante contingencias y evitando interrupciones innecesarias.

La sala de generador, con dimensiones de 8 m x 6 m, permite suficiente espacio para el mantenimiento rutinario, el acceso de personal y la instalación de servicios auxiliares como agua, drenaje y comunicaciones, cumpliendo con las recomendaciones de normas NFPA 110 y NFPA 37, el Código de Construcción local y regulaciones ambientales sobre emisiones y ruido, lo que garantiza la seguridad operativa y el cumplimiento normativo integral. Este enfoque integral asegura que no solo se cumplan los criterios técnicos de operación, sino que también se optimice la confiabilidad y disponibilidad del sistema a lo largo de su vida útil proyectada.

Económicamente, el grupo electrógeno diésel representa la opción más rentable frente a tecnologías alternativas como sistemas UPS de ion-litio, configuraciones híbridas o celdas de combustible de hidrógeno.

Un análisis de sensibilidad muestra que incluso bajo variaciones significativas en los parámetros de proyecto, la rentabilidad se mantiene positiva. Por ejemplo, frente a diferentes frecuencias de interrupciones, con cuatro interrupciones anuales el VPN es de \$378,000 y la TIR de 42%, mientras que con ocho interrupciones el VPN asciende a \$754,200 y la TIR a 98%, y con doce interrupciones el VPN alcanza \$1,130,400 con una TIR de 154%, confirmando la solidez financiera del proyecto frente a escenarios operativos variables.

Asimismo, frente a incrementos en la inversión inicial, el proyecto mantiene viabilidad: con un aumento del 20%, el VPN es de \$636,800 y la TIR de 78%; con un aumento del 50%, el VPN es de \$410,700 y la TIR de 48%; y aún duplicando la inversión, el VPN permanece positivo en \$67,200 con una TIR de 12%, lo que demuestra la robustez de la inversión y la capacidad del proyecto para absorber variaciones de costos sin comprometer su rentabilidad.

Los costos operativos, aun incrementándose un 50% o 100%, afectan de manera limitada la rentabilidad debido a su magnitud relativamente pequeña frente al beneficio económico generado por la continuidad de la operación y la prevención de pérdidas asociadas a interrupciones prolongadas. Esto evidencia que el grupo electrógeno no solo es técnicamente confiable, sino que también representa una inversión financieramente sólida

a largo plazo, con un retorno de inversión rápido y beneficios económicos acumulativos significativos.

Desde la perspectiva operativa, el sistema seleccionado ofrece alta confiabilidad, con una disponibilidad del 99.5% y una confiabilidad anual del 97%, asegurando que las operaciones académicas y administrativas no se vean afectadas por fallas del sistema. La implementación de un programa de mantenimiento preventivo riguroso, que incluye inspecciones mensuales, pruebas de carga trimestrales, cambios de aceite y filtros, análisis de combustible semestrales y calibración anual de instrumentos, contribuye a incrementar la confiabilidad del sistema en un 15-20%.

Además, la instalación en un ambiente controlado mejora la confiabilidad en un 10% adicional, mientras que el uso de combustible de alta calidad y aditivos estabilizadores reduce en un 30% los riesgos asociados a fallas en el sistema de combustible, generando una operación confiable y segura. Los componentes principales, incluyendo el motor diésel, el alternador, el sistema de transferencia automática y el sistema de control digital, cuentan con tasas de falla bajas, lo que permite una planificación eficiente del mantenimiento y una rápida respuesta ante contingencias, minimizando tiempos de inactividad y protegiendo la integridad de los equipos.

El análisis de modos de falla, considerando factores como sobrecarga, fallas del sistema de control, contaminación de combustible o pérdida de excitación, confirma que las medidas de mitigación implementadas, incluyendo sistemas redundantes y alarmas de monitoreo continuo, aseguran una respuesta oportuna ante eventos imprevistos y previenen daños significativos al equipo o interrupciones prolongadas de operación.

Asimismo, el análisis de estabilidad transitoria indica que el sistema puede mantener el sincronismo y la estabilidad de voltaje incluso durante perturbaciones significativas, como arranque de motores grandes, desconexión súbita de cargas, cortocircuitos trifásicos y pérdida de excitación. Durante el arranque de un motor de 20 HP, la caída transitoria de voltaje de 12% se recupera en 2.8 segundos, mientras que la frecuencia experimenta una reducción máxima de 1.2% con recuperación en 3.5 segundos, lo que garantiza la continuidad operativa sin comprometer la estabilidad del sistema.

En escenarios de desconexión súbita del 50% de la carga, se observa una sobretensión transitoria del 8% y un incremento de frecuencia del 1.8%, recuperándose a condiciones nominales en 4.2 segundos gracias a la acción coordinada del regulador automático de

voltaje y el regulador de velocidad. Frente a un cortocircuito trifásico, el voltaje en el punto de falla se reduce a cero pero se restablece completamente tras la eliminación de la falla, mientras que la corriente de cortocircuito alcanza 2.8 veces la corriente nominal del alternador, dentro de la capacidad del equipo.

En caso de pérdida de excitación, las protecciones del alternador detectan la condición en 1.2 segundos y desconectan el generador, evitando daños graves al equipo, lo que evidencia la robustez de la solución frente a escenarios críticos y la capacidad del sistema para garantizar la continuidad de las operaciones académicas y administrativas sin interrupciones prolongadas.

Finalmente, al comparar con tecnologías alternativas, el grupo electrógeno diésel destaca por su costo inicial relativamente bajo, tecnología madura, disponibilidad de soporte local, autonomía extendida y facilidad de mantenimiento.

Mientras que los sistemas UPS de baterías presentan altos costos iniciales, autonomía limitada y necesidad de reemplazo periódico de baterías, y los sistemas híbridos requieren complejidad operativa adicional y costos de mantenimiento más elevados, el grupo electrógeno diésel proporciona un equilibrio adecuado entre inversión, operación, confiabilidad y capacidad de respuesta frente a interrupciones prolongadas. Las celdas de combustible de hidrógeno, aunque atractivas por su sostenibilidad y eficiencia, no son viables actualmente debido a su alto costo, falta de infraestructura y tecnología en desarrollo.

Por lo tanto, la selección del grupo electrógeno diésel de 125 kVA se confirma como la alternativa óptima para garantizar continuidad operativa, eficiencia económica y confiabilidad a largo plazo, asegurando un respaldo sólido y sostenible para el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, y posicionando a la institución como referente en infraestructura educativa confiable y segura.

4.2. Cronograma

4.2.1. Planificación general del proyecto

La implementación del sistema de emergencia para el Bloque E requiere una planificación cuidadosa que considere las actividades académicas de la universidad, la disponibilidad de recursos, y la coordinación entre múltiples especialidades técnicas. El cronograma se ha estructurado en fases secuenciales que minimizan las interrupciones operativas y aseguran la calidad de la instalación.

Estructura del cronograma

El proyecto se divide en cinco fases principales:

Fase 1: Ingeniería de detalle y permisos (Semanas 1-6)

Esta fase incluye el desarrollo de la ingeniería de detalle, la obtención de permisos y aprobaciones, y la preparación de documentos de licitación. Es crítica para el éxito del proyecto ya que establece las bases técnicas y legales para la implementación.

Fase 2: Adquisiciones y fabricación (Semanas 4-16)

Comprende la licitación, adjudicación y fabricación de equipos principales. Esta fase se superpone parcialmente con la Fase 1 para optimizar el tiempo total del proyecto.

Fase 3: Obra civil y preparación del sitio (Semanas 12-20)

Incluye la construcción de la sala del generador, instalación de sistemas auxiliares, y preparación de la infraestructura necesaria para recibir los equipos.

Fase 4: Instalación eléctrica y mecánica (Semanas 18-26)

Comprende la instalación de todos los equipos eléctricos y mecánicos, incluyendo el grupo electrógeno, sistema de transferencia, y modificaciones al sistema de distribución existente.

Fase 5: Pruebas y puesta en servicio (Semanas 24-28)

Incluye todas las pruebas de funcionamiento, ajustes, capacitación del personal, y entrega final del sistema.

4.2.2. Cronograma detallado por fases

Fase 1: Ingeniería de detalle y permisos (Semanas 1-6)

Semana 1-2: Ingeniería de detalle

- Desarrollo de planos de instalación eléctrica
- Diseño de la sala del generador y sistemas auxiliares
- Especificaciones técnicas detalladas de equipos
- Cálculos de ingeniería y análisis de cortocircuito
- Actualización del estudio de coordinación de protecciones

Semana 2-3: Documentación regulatoria

- Preparación de documentos para permisos municipales

- Solicitud de aprobación del Cuerpo de Bomberos
- Documentación para CNEL EP (modificaciones al punto de entrega)
- Estudios de impacto ambiental y acústico

Semana 3-4: Documentos de licitación

- Especificaciones técnicas de equipos principales
- Planos de construcción y montaje
- Términos de referencia para contratistas
- Criterios de evaluación y adjudicación

Semana 4-6: Proceso de licitación

- Publicación de licitación
- Período de consultas y aclaraciones
- Evaluación de propuestas técnicas y económicas
- Adjudicación de contratos

Fase 2: Adquisiciones y fabricación (Semanas 4-16)

Semana 4-6: Licitación de equipos principales

- Grupo electrógeno: Especificaciones técnicas detalladas, evaluación de propuestas de fabricantes reconocidos (Caterpillar, Cummins, Kohler), considerando no solo el precio sino también la disponibilidad de servicio técnico local y repuestos.
- Sistema de transferencia automática: Evaluación de sistemas compatibles con el grupo electrógeno seleccionado, considerando capacidades de comunicación y monitoreo remoto.

Semana 6-8: Adjudicación y órdenes de compra

- Negociación final de términos y condiciones
- Emisión de órdenes de compra
- Establecimiento de cronogramas de fabricación y entrega
- Definición de puntos de inspección durante fabricación

Semana 8-14: Fabricación de equipos

- Fabricación del grupo electrógeno según especificaciones

- Pruebas de fábrica del grupo electrógeno (prueba de potencia, regulación de voltaje, respuesta transitoria)
- Fabricación del sistema de transferencia automática
- Pruebas de integración entre grupo electrógeno y ATS

Semana 12-16: Fabricación de componentes auxiliares

- Tableros eléctricos y sistemas de protección
- Sistemas de combustible (tanques, bombas, tuberías)
- Sistemas de control y monitoreo
- Equipos de obra civil (ventiladores, sistemas contra incendios)

Fase 3: Obra civil y preparación del sitio (Semanas 12-20)

Semana 12-14: Preparación del sitio

- Demolición de estructuras existentes si es necesario
- Excavación para cimentaciones del grupo electrógeno
- Excavación para tanque de combustible subterráneo
- Preparación de accesos para equipos pesados

Semana 14-16: Cimentaciones y estructura

- Construcción de cimentación del grupo electrógeno con aislamiento de vibraciones
- Instalación de tanque de combustible con sistema de contención secundaria
- Construcción de muros de la sala del generador con tratamiento acústico
- Instalación de estructura del techo con consideraciones de ventilación

Semana 16-18: Sistemas auxiliares

- Instalación de sistema de ventilación mecánica
- Instalación de sistema de detección y supresión de incendios
- Instalación de sistema de drenaje de la sala
- Preparación de canalizaciones eléctricas

Semana 18-20: Acabados y preparación para equipos

- Acabados interiores de la sala del generador
- Instalación de iluminación y tomacorrientes
- Preparación de rieles y sistemas de izaje para instalación de equipos

- Pruebas de sistemas auxiliares

Fase 4: Instalación eléctrica y mecánica (Semanas 18-26)

Semana 18-20: Recepción e inspección de equipos

- Recepción del grupo electrógeno en sitio
- Inspección de daños de transporte
- Verificación de especificaciones contra documentos de compra
- Almacenamiento temporal en condiciones apropiadas

Semana 20-22: Instalación mecánica

- Instalación del grupo electrógeno en su cimentación
- Conexión de sistemas de combustible
- Instalación de sistema de escape con silenciador
- Conexión de sistemas de enfriamiento

Semana 22-24: Instalación eléctrica principal

- Instalación del tablero de transferencia automática
- Conexión del grupo electrógeno al tablero de transferencia
- Modificación de circuitos de cargas críticas
- Instalación de sistema de puesta a tierra

Semana 24-26: Sistemas de control y auxiliares

- Instalación de sistemas de control y monitoreo
- Conexión de sistemas de comunicación
- Instalación de instrumentación y medición
- Conexión de sistemas auxiliares (ventilación, detección de incendios)

Fase 5: Pruebas y puesta en servicio (Semanas 24-28)

Semana 24-25: Pruebas individuales de equipos

- Pruebas de funcionamiento del grupo electrógeno sin carga
- Verificación de parámetros de voltaje, frecuencia y regulación
- Pruebas del sistema de transferencia automática
- Verificación de sistemas de protección y alarmas

Semana 25-26: Pruebas de integración del sistema

- Pruebas de transferencia automática con cargas simuladas

- Verificación de secuencias de arranque y parada
- Pruebas de sistemas de comunicación y monitoreo remoto
- Ajuste fino de parámetros de control

Semana 26-27: Pruebas con cargas reales

- Pruebas de carga progresiva hasta capacidad nominal
- Verificación de comportamiento con cargas críticas reales
- Pruebas de arranque de motores y cargas inductivas
- Medición de parámetros de calidad de energía

Semana 27-28: Documentación y entrega

- Preparación de manuales de operación y mantenimiento
- Capacitación del personal de mantenimiento de la universidad
- Entrega de certificados de pruebas y garantías
- Puesta en servicio oficial del sistema

4.2.3. Recursos y responsabilidades

Equipo del proyecto

Director del proyecto: Ingeniero eléctrico con experiencia en sistemas de potencia y gestión de proyectos. Responsable de la coordinación general, cumplimiento de cronograma y presupuesto.

Ingeniero de diseño: Especialista en sistemas de emergencia eléctrica. Responsable de la ingeniería de detalle, especificaciones técnicas y supervisión de instalación.

Ingeniero de obra civil: Responsable del diseño y supervisión de la construcción de la sala del generador y obras civiles asociadas.

Supervisor de instalación: Técnico especializado en grupos electrógenos. Responsable de la supervisión directa de la instalación y pruebas de equipos.

Coordinador de permisos: Responsable de la gestión de permisos y aprobaciones regulatorias.

Recursos externos

Contratista principal: Empresa especializada en instalación de sistemas de emergencia eléctrica, con experiencia comprobada en proyectos similares.

Proveedor del grupo electrógeno: Fabricante o distribuidor autorizado con capacidad de servicio técnico local.

Contratista de obra civil: Empresa constructora con experiencia en obras industriales y manejo de equipos pesados.

Laboratorio de pruebas: Laboratorio acreditado para realizar pruebas de puesta en servicio y certificación de equipos.

4.2.4. Gestión de riesgos del cronograma

Identificación de riesgos

Retrasos en permisos: Los procesos de aprobación regulatoria pueden extenderse más allá de lo planificado debido a requisitos adicionales o demoras administrativas.

Disponibilidad de equipos: Los grupos electrógenos de especificaciones particulares pueden tener tiempos de entrega extendidos, especialmente durante períodos de alta demanda.

Condiciones climáticas: Las lluvias intensas pueden retrasar las actividades de obra civil y la instalación de equipos.

Interferencias con actividades académicas: Las modificaciones al sistema eléctrico existente deben coordinarse cuidadosamente para no interrumpir las actividades del Bloque E.

Disponibilidad de personal especializado: La escasez de técnicos especializados en grupos electrógenos puede afectar el cronograma de instalación.

Estrategias de mitigación

Gestión proactiva de permisos: Iniciar los procesos de permisos con anticipación y mantener comunicación regular con las autoridades regulatorias.

Órdenes de compra tempranas: Adjudicar los equipos principales tan pronto como sea posible para asegurar los tiempos de entrega.

Planificación estacional: Programar las actividades de obra civil durante la estación seca para minimizar retrasos climáticos.

Coordinación académica: Establecer ventanas de trabajo durante períodos de menor actividad académica (vacaciones, fines de semana).

Contratos con penalizaciones: Incluir cláusulas de penalización por retrasos en los contratos principales para incentivar el cumplimiento de cronogramas.

Plan de contingencia

Cronograma acelerado: En caso de retrasos, se puede implementar un cronograma acelerado con trabajo en turnos extendidos y fines de semana.

Instalación temporal: Si es necesario, se puede instalar un grupo electrógeno temporal mientras se completa la instalación permanente.

Fases diferidas: Algunos elementos no críticos (como sistemas de monitoreo avanzado) pueden diferirse para una fase posterior si es necesario cumplir con fechas críticas.

4.3. Viabilidad técnica y conclusiones y recomendaciones

4.3.1. Evaluación de viabilidad técnica

La evaluación integral de la viabilidad técnica del sistema de emergencia propuesto para el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana confirma que el proyecto es factible desde el punto de vista técnico y cumple con todos los requisitos normativos y operativos establecidos por la ingeniería eléctrica moderna. Este análisis no se limita únicamente a comprobar la capacidad de generación, sino que abarca aspectos de calidad de energía, compatibilidad con la infraestructura existente, facilidad de instalación y cumplimiento con los marcos regulatorios nacionales e internacionales. En este sentido, los resultados obtenidos reflejan que el diseño propuesto no solo garantiza la continuidad del suministro eléctrico durante interrupciones del servicio, sino que también asegura la confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad del sistema a lo largo de su vida útil.

Viabilidad del dimensionamiento eléctrico

En primer lugar, la adecuación de la capacidad instalada constituye uno de los factores más relevantes en la definición del sistema de emergencia. El grupo electrógeno seleccionado de 125 kVA ofrece un margen de seguridad del 33% respecto a la demanda máxima de cargas críticas del Bloque E, estimada en 84.3 kVA. Dicho margen supera las recomendaciones mínimas establecidas por las normas **NFPA 110** e **IEEE 446**, las cuales establecen que todo sistema de respaldo debe contar con al menos un 25% adicional para garantizar su correcto funcionamiento bajo condiciones de sobrecarga temporal. Este excedente de capacidad resulta fundamental, pues asegura la cobertura ante incrementos inesperados de demanda, expansiones futuras del edificio y picos transitorios generados por el arranque de equipos de alto consumo. De esta forma, el dimensionamiento

seleccionado no solo responde a las necesidades actuales, sino que también anticipa el crecimiento operativo de la institución en los próximos años.

Por otro lado, las simulaciones efectuadas en software especializado confirman que el alternador síncrono acoplado al motor diésel es plenamente compatible con las cargas críticas identificadas en el Bloque E. En efecto, el sistema responde adecuadamente ante la presencia de cargas lineales como iluminación y resistencias, cargas inductivas como motores de aire acondicionado y ventiladores, así como cargas no lineales vinculadas a equipos informáticos y fuentes conmutadas. Además, se verificó su correcto desempeño frente a cargas con alto factor de arranque, como bombas hidráulicas, las cuales generan corrientes iniciales elevadas que suelen comprometer el funcionamiento de generadores de menor capacidad. Esta compatibilidad es crucial, dado que la naturaleza mixta de las cargas en el entorno universitario exige un sistema robusto que pueda adaptarse a distintos perfiles de consumo eléctrico.

En lo referente a la calidad de energía, los parámetros obtenidos durante las simulaciones demuestran que el grupo electrógeno cumple ampliamente con las normativas internacionales vigentes. La regulación de voltaje se mantiene en $\pm 2.5\%$, frente al límite permitido de $\pm 5\%$, lo que asegura la estabilidad de equipos sensibles a variaciones de tensión. Asimismo, la estabilidad de frecuencia se ubica en $\pm 0.2\%$, muy por debajo del máximo permitido del 2%, garantizando que los dispositivos electrónicos y de comunicaciones funcionen sin riesgo de daños o interrupciones. De igual manera, la distorsión armónica total (THD) se sitúa en 3.2% para el voltaje y 6.8% para la corriente, ambos valores dentro de los márgenes establecidos por la **IEEE 519**, lo que refleja un comportamiento eléctrico limpio y compatible con las exigencias de calidad de energía en instalaciones críticas.

Viabilidad de la integración al sistema existente

En segundo lugar, la viabilidad técnica del sistema también se analiza desde su integración con la infraestructura eléctrica actual del Bloque E. El sistema de transferencia automática de 200A fue seleccionado en función de la capacidad del tablero principal de 800A, lo cual permite su acoplamiento directo sin necesidad de modificaciones estructurales significativas. Esta compatibilidad representa una ventaja importante, ya que evita costos adicionales asociados a la reconfiguración de tableros o líneas de distribución, al tiempo que reduce los tiempos de instalación. Asimismo, el

diseño contempla una transferencia rápida y segura de la carga, garantizando que el suministro eléctrico a los equipos críticos se mantenga con mínima interrupción.

En cuanto a la coordinación de protecciones, el estudio realizado confirma que las protecciones actualmente instaladas en el sistema eléctrico del Bloque E resultan compatibles con las características de operación del grupo electrógeno. Únicamente se requieren ajustes menores en algunos relés de protección para optimizar la respuesta ante cortocircuitos y sobrecargas, lo que refuerza la confiabilidad del sistema sin necesidad de reemplazar equipos ya existentes. Este aspecto es relevante, dado que asegura una correcta selectividad y discriminación en la operación de los dispositivos de protección, evitando disparos innecesarios y garantizando la seguridad tanto del personal como de la infraestructura.

En relación con el transformador principal de 750 kVA, los estudios de carga demuestran que la incorporación del sistema de emergencia no genera impactos negativos en su operación. Actualmente, el transformador opera al 19% de su capacidad nominal, lo que significa que cuenta con un margen de reserva importante. Las cargas críticas que serán abastecidas por el generador representan apenas un 11% adicional de dicha capacidad, lo cual mantiene al transformador dentro de niveles seguros de operación. Este análisis garantiza que la interacción entre el sistema de emergencia y la red existente sea armónica, sin riesgos de sobrecarga o degradación prematura de los equipos principales.

Viabilidad constructiva y de instalación

En tercer lugar, la viabilidad del proyecto depende también de factores constructivos y logísticos asociados a la instalación del grupo electrógeno. En este sentido, el espacio disponible identificado para la sala del generador, con dimensiones de 8 metros por 6 metros, cumple con los requerimientos establecidos por las normas internacionales para la ubicación y mantenimiento de equipos de este tipo. Este espacio no solo permite la instalación del generador, sino que también garantiza áreas de circulación adecuadas para realizar inspecciones, mantenimientos y reparaciones de manera segura y eficiente.

Asimismo, la accesibilidad al sitio constituye un aspecto favorable, ya que la ruta desde la vía pública hasta el lugar de instalación se encuentra libre de obstáculos y con dimensiones adecuadas para el ingreso de maquinaria pesada. Esto facilita el transporte del grupo electrógeno y de los equipos auxiliares, reduciendo los riesgos de retrasos durante la fase constructiva. Igualmente, la localización seleccionada ofrece la ventaja de

estar próxima a servicios auxiliares como agua, drenaje y comunicaciones, lo cual simplifica las conexiones necesarias sin requerir modificaciones mayores a la infraestructura del edificio.

Otro punto crítico dentro de la viabilidad constructiva es el cumplimiento normativo. El diseño propuesto se ajusta a regulaciones internacionales de alto nivel, incluyendo la **NFPA 110**, que establece los estándares para sistemas de energía de emergencia y standby, la **NFPA 37**, que regula la instalación y uso de motores de combustión interna estacionarios, y el **NEC Artículo 700**, que especifica los requerimientos de sistemas de emergencia en instalaciones eléctricas. Además, el proyecto respeta el código de construcción local y las regulaciones ambientales vigentes en materia de emisiones y control de ruido, lo que asegura su aceptación por parte de las autoridades competentes y su operación sostenible en el entorno urbano.

Consideraciones finales sobre la viabilidad técnica

En conjunto, todos los aspectos analizados confirman que el sistema de emergencia propuesto es técnicamente viable y garantiza un desempeño confiable, seguro y eficiente. La adecuada selección del dimensionamiento eléctrico, la compatibilidad con las cargas existentes, la calidad superior de energía, la facilidad de integración al sistema eléctrico del Bloque E y las condiciones favorables de instalación consolidan un proyecto robusto y alineado con las mejores prácticas de la ingeniería.

Además, el cumplimiento estricto de las normativas internacionales y locales no solo asegura la seguridad de los usuarios y del personal de mantenimiento, sino que también refuerza la credibilidad de la institución frente a organismos reguladores, auditores externos y la comunidad universitaria en general. De esta forma, la Universidad Politécnica Salesiana se posiciona como un referente en infraestructura educativa confiable y sostenible, capaz de responder a las exigencias energéticas de un entorno académico cada vez más dependiente de la tecnología.

En consecuencia, la viabilidad técnica del sistema de emergencia del Bloque E trasciende la simple instalación de un generador eléctrico, ya que implica un compromiso institucional con la seguridad, la continuidad académica y la innovación tecnológica. Este proyecto no solo protege los equipos y procesos críticos, sino que también asegura un entorno estable para el desarrollo de la docencia, la investigación y la vinculación con la sociedad, pilares fundamentales de la misión universitaria.

4.3.2. Análisis de riesgos técnicos

Riesgos identificados y medidas de mitigación en el sistema de emergencia del Bloque E

La gestión de riesgos en sistemas eléctricos de emergencia constituye un componente esencial para garantizar la confiabilidad operativa de infraestructuras críticas, especialmente en entornos educativos como el Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana, donde la continuidad del servicio eléctrico asegura no solo la operación de equipos tecnológicos de alta sensibilidad, sino también la seguridad de estudiantes y personal. Los grupos electrógenos diésel, aunque altamente confiables, presentan vulnerabilidades técnicas y operativas que deben evaluarse sistemáticamente. Identificar los riesgos potenciales, establecer medidas de mitigación y diseñar un plan integral de mantenimiento preventivo permite reducir la probabilidad de fallas, limitar sus consecuencias y asegurar que el sistema responda de manera óptima en caso de contingencia.

A diferencia de un sistema eléctrico convencional, un grupo electrógeno de emergencia debe garantizar un arranque rápido, estable y confiable bajo condiciones críticas, cuando la red pública falla de manera imprevista. Esta condición lo convierte en un sistema de alta exigencia, donde incluso una falla mínima puede derivar en consecuencias significativas. Por esta razón, la evaluación de riesgos no solo considera los aspectos técnicos de la generación, sino también factores externos como la calidad del combustible, el entorno ambiental, la interacción con otros equipos y la respuesta del personal encargado de la operación.

En el presente análisis se identifican riesgos clave asociados a la operación del grupo electrógeno de 125 kVA, así como medidas de mitigación aplicables. Además, se desarrolla un análisis detallado de modos de falla, orientado a detectar causas potenciales, mecanismos de fallo, efectos y estrategias de respuesta. Este enfoque estructurado proporciona a la universidad una base sólida para gestionar el sistema de emergencia de manera integral, maximizando su confiabilidad y prolongando su vida útil.

Riesgo de sobrecarga del grupo electrógeno

El riesgo de sobrecarga se presenta cuando la demanda de energía de las cargas conectadas supera la capacidad nominal del grupo electrógeno. Aunque el generador instalado de 125 kVA cuenta con un margen de seguridad del 33% respecto a la carga

crítica máxima de 84.3 kVA, la posibilidad de que se conecten cargas no previstas o que se produzcan picos de demanda hace necesario considerar este riesgo.

La probabilidad de ocurrencia es baja debido a que el dimensionamiento ha sido realizado conforme a normas como la **NFPA 110** y la **IEEE 446**, que recomiendan márgenes de reserva. Sin embargo, el impacto de una sobrecarga es alto, ya que puede derivar en sobrecalentamiento del motor, disparo de protecciones, deterioro del aislamiento del alternador y apagado inesperado del sistema.

Las medidas de mitigación incluyen la implementación de un sistema de gestión de cargas por prioridad, que desconecte de manera automática los circuitos menos críticos en caso de sobrecarga, garantizando que solo permanezcan conectadas las cargas esenciales como iluminación de emergencia, sistemas de comunicación y equipos informáticos prioritarios. Adicionalmente, el monitoreo continuo de la carga mediante controladores digitales permite generar alarmas de pre-sobrecarga, anticipando acciones correctivas antes de que se produzca un fallo.

Riesgo de falla del sistema de transferencia automática (ATS)

El sistema de transferencia automática (ATS) constituye el componente que asegura el traspaso rápido de la carga desde la red pública hacia el grupo electrógeno durante una interrupción. Su importancia es tal que una falla en este dispositivo podría dejar inutilizado todo el sistema de emergencia, incluso si el generador funciona correctamente.

La probabilidad de falla es media, pues aunque los ATS modernos presentan altos niveles de confiabilidad, son susceptibles a fallas mecánicas, electrónicas o de programación. El impacto de su mal funcionamiento es alto, ya que impediría que las cargas críticas reciban energía en el momento necesario.

Como medidas de mitigación, se recomienda la selección de un ATS de alta confiabilidad, certificado bajo normas internacionales como la **IEC 60947-6-1**. El mantenimiento preventivo debe incluir pruebas funcionales trimestrales y verificaciones del estado de contactos, mecanismos de conmutación y controladores electrónicos. Adicionalmente, resulta indispensable disponer de un sistema de transferencia manual de respaldo, que permita conmutar la carga hacia el grupo electrógeno en caso de fallo del ATS, asegurando así la continuidad operativa.

Riesgo de contaminación del combustible

El combustible diésel, al estar almacenado por períodos prolongados, puede deteriorarse por la presencia de agua, microorganismos o sedimentos. La contaminación del combustible representa un riesgo de nivel medio, ya que puede obstruir filtros, dañar inyectores y reducir la eficiencia del motor, provocando fallas de arranque o pérdida de potencia durante la operación.

El impacto es medio, puesto que aunque no necesariamente produce fallas instantáneas, compromete progresivamente la confiabilidad del sistema. Para mitigar este riesgo, se recomienda la implementación de un sistema de filtración múltiple que elimine partículas sólidas y agua. Asimismo, es necesario realizar análisis periódicos de la calidad del combustible y utilizar aditivos estabilizadores que retrasen su degradación.

Otra medida consiste en rotar el combustible almacenado mediante un programa de consumo planificado en otros equipos, de modo que el diésel no permanezca almacenado más allá de seis meses, evitando la formación de sedimentos y contaminantes biológicos.

Riesgo de falla de arranque en emergencia

Uno de los riesgos más críticos es la imposibilidad del generador de arrancar cuando ocurre una emergencia. Aunque la probabilidad es baja, debido al mantenimiento planificado, el impacto es alto, ya que compromete por completo la capacidad del sistema de emergencia de cumplir su función.

Las causas más comunes de este tipo de falla incluyen baterías descargadas, fallas en el motor de arranque, baja temperatura del motor o problemas en los sistemas de control. Para mitigar este riesgo, se propone la instalación de un sistema de arranque redundante, que contemple dos baterías independientes y un calentador de bloque del motor que mantenga la temperatura óptima para un arranque inmediato.

Las pruebas mensuales en condiciones de carga real resultan imprescindibles para asegurar que el generador responda adecuadamente. Además, se recomienda incluir un plan de inspección diaria de los niveles de aceite, refrigerante y estado de las baterías, con registros que permitan detectar anomalías a tiempo.

Riesgo de interferencia con equipos sensibles

El grupo electrógeno, al ser una fuente independiente de energía, puede generar armónicos eléctricos o fluctuaciones de voltaje que interfieran con equipos electrónicos

sensibles, como servidores, sistemas de comunicación y equipos médicos. Aunque la probabilidad es baja, el impacto puede ser medio, dado que la alteración en la calidad de energía podría ocasionar reinicios o fallos de funcionamiento en dispositivos críticos.

La mitigación de este riesgo se logra mediante la instalación de filtros de armónicos, una regulación estricta de voltaje y frecuencia, y un sistema de puesta a tierra mejorado que reduzca interferencias electromagnéticas. Además, la segregación de cargas mediante tableros diferenciados para equipos sensibles y no sensibles disminuye el riesgo de que perturbaciones eléctricas afecten la totalidad de los sistemas conectados.

Análisis de modos de falla (FMEA)

Falla del motor diésel

El motor diésel es el corazón del sistema de generación. Entre las principales causas de falla se encuentran la falta de mantenimiento preventivo, la contaminación del combustible y el sobrecalentamiento por deficiencias en el sistema de enfriamiento. Estos fallos pueden derivar en la pérdida total del sistema de emergencia.

La detección temprana se realiza mediante el monitoreo continuo de parámetros como presión de aceite, temperatura del refrigerante y revoluciones del motor. En caso de anomalías, el sistema activa alarmas inmediatas y, de ser necesario, una parada automática para evitar daños mayores. Las medidas de respuesta incluyen la corrección de las condiciones que originaron el fallo y la programación de mantenimientos correctivos.

Falla del alternador

El alternador es el componente encargado de transformar la energía mecánica del motor en energía eléctrica. Sus fallas más frecuentes se relacionan con sobrecarga, deterioro de los aislamientos o fallos en el sistema de excitación. Estas situaciones provocan la pérdida de generación eléctrica, lo que impacta directamente en la capacidad de suministro a las cargas críticas.

El monitoreo de voltaje, corriente y temperatura permite detectar anomalías en el alternador. Ante la identificación de un fallo, las protecciones automáticas desconectan el equipo de manera segura para evitar daños catastróficos. Las medidas de mitigación incluyen inspecciones periódicas de aislamiento, pruebas de resistencia dieléctrica y limpieza regular de devanados.

Falla del sistema de control

El sistema de control electrónico gestiona el arranque automático, la transferencia de carga y el monitoreo de parámetros. Sus fallas pueden tener origen en defectos de componentes electrónicos, errores de programación o interferencias electromagnéticas. El efecto inmediato es la pérdida de automatización, requiriendo que la operación se realice manualmente.

El autodiagnóstico continuo del controlador permite identificar fallos de manera temprana y activar alarmas que adviertan al personal. Como respuesta, el sistema puede operarse en modo manual, garantizando así la continuidad del suministro hasta que se realice la reparación.

El análisis de riesgos y modos de falla demuestra que, aunque el sistema de emergencia del Bloque E de la Universidad Politécnica Salesiana presenta riesgos inherentes a su naturaleza, todos ellos son mitigables mediante una adecuada selección de equipos, mantenimiento preventivo y protocolos de operación. La combinación de monitoreo continuo, redundancia en sistemas críticos, pruebas periódicas y capacitación del personal constituye la estrategia más efectiva para asegurar la confiabilidad del generador en situaciones de contingencia.

La universidad, al adoptar estas medidas, fortalece su capacidad de respuesta frente a interrupciones del suministro eléctrico, protegiendo la integridad de su comunidad y garantizando la continuidad de sus actividades académicas y administrativas. En consecuencia, el sistema de emergencia no debe concebirse únicamente como un respaldo eléctrico, sino como un pilar estratégico de resiliencia institucional.

Conclusiones

En primer lugar, el análisis detallado de las cargas críticas y las simulaciones realizadas confirman que el grupo electrógeno de 125 kVA constituye la selección más adecuada para cubrir los requerimientos del Bloque E, puesto que el margen de seguridad del 33% asegura no solo confiabilidad operativa sino también capacidad de respuesta frente al crecimiento futuro. Asimismo, los parámetros de calidad de energía obtenidos en las simulaciones superan holgadamente los requisitos normativos, lo cual garantiza la compatibilidad plena con todos los equipos sensibles del edificio y asegura un desempeño estable a largo plazo.

De igual manera, la integración del sistema de emergencia con la infraestructura eléctrica existente resulta técnica y económicamente factible, dado que no requiere modificaciones mayores y con ello se minimizan los costos y la complejidad de la instalación. Finalmente, cabe resaltar que el diseño propuesto cumple con todas las normativas nacionales e internacionales vigentes, asegurando así tanto la seguridad como la confiabilidad del sistema.

En cuanto a los aspectos económicos, el análisis realizado demuestra que el proyecto ofrece una rentabilidad excepcional, ya que alcanza un VPN de \$754,200, una TIR del 98.5% y un período de recuperación de apenas 1.1 años, lo que lo convierte en una inversión altamente atractiva.

Además, los resultados de la evaluación de sensibilidad confirman que la rentabilidad se mantiene positiva incluso bajo escenarios adversos, evidenciando con ello la solidez y robustez de la inversión. A esto se suman beneficios intangibles de gran relevancia, como la mejora de la imagen institucional, el cumplimiento de las normativas aplicables y la tranquilidad operativa que ofrece un sistema confiable y bien dimensionado, lo que refuerza aún más el valor integral del proyecto.

Con respecto a las conclusiones operativas, es importante señalar que el sistema propuesto alcanza una confiabilidad calculada del 97% anual y una disponibilidad del 99.5%, lo que le permite cumplir con los estándares más exigentes en materia de sistemas críticos. Asimismo, gracias al sistema de control automático, se minimiza la intervención humana durante las emergencias, mientras que las interfaces intuitivas de usuario facilitan significativamente tanto la operación como las labores de mantenimiento.

Además, el análisis técnico, económico y operativo desarrollado confirma que la implementación del grupo electrógeno de 125 kVA no solo cubre las necesidades actuales del Bloque E, sino que también constituye una solución escalable frente a los requerimientos futuros de la universidad. La combinación de confiabilidad energética, eficiencia en costos y cumplimiento normativo crea un marco integral que garantiza la continuidad de las actividades académicas y de investigación, minimizando los riesgos asociados a fallas eléctricas y reforzando la seguridad de estudiantes, docentes y personal administrativo. De este modo, el proyecto se alinea con los objetivos estratégicos institucionales y contribuye al fortalecimiento de la infraestructura universitaria en un contexto de creciente demanda tecnológica.

Por otra parte, la puesta en marcha del sistema de emergencia representa un ejemplo de inversión sostenible y visionaria, ya que no solo mejora la resiliencia energética de la institución, sino que también sienta las bases para futuras innovaciones vinculadas a energías limpias y gestión inteligente de recursos. La universidad, al adoptar este tipo de proyectos, refuerza su liderazgo en la implementación de soluciones modernas y responsables, proyectando una imagen institucional sólida y comprometida con la excelencia académica y la sostenibilidad. En consecuencia, la decisión de avanzar con esta implementación no solo es técnicamente justificada y económicamente viable, sino también estratégica para consolidar a la Universidad Politécnica Salesiana como referente en infraestructura educativa confiable, segura y orientada al futuro.

Recomendaciones

En primer lugar, para asegurar una implementación exitosa del sistema de emergencia mediante grupo electrógeno en el Bloque E, resulta indispensable establecer una gestión de proyecto sólida. Por ello, se recomienda conformar un equipo multidisciplinario que integre representantes de ingeniería, operaciones, mantenimiento y administración, de modo que se garantice una visión integral en cada etapa. Al mismo tiempo, debe adoptarse un sistema de gestión formal que contemple seguimiento semanal de avances y control de cambios documentado, acompañado de puntos de control de calidad en cada fase con el fin de verificar el cumplimiento de especificaciones.

De igual manera, la selección de proveedores juega un papel crítico, razón por la cual conviene priorizar a aquellos con experiencia comprobada en proyectos similares y presencia local, además de exigir garantías extendidas y cláusulas contractuales que contemplen penalizaciones por retrasos y bonificaciones por entregas tempranas. Finalmente, antes de la puesta en servicio, se vuelve necesario capacitar al personal en operación y mantenimiento del sistema, complementando con un programa de actualización continua y la elaboración de procedimientos operativos estándar que faciliten la gestión diaria.

En segundo lugar, para garantizar un funcionamiento confiable en el tiempo, es fundamental diseñar un plan de operación que contemple acciones preventivas y correctivas bien estructuradas. En este sentido, se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo en base a las especificaciones del fabricante y la experiencia operativa acumulada, estableciendo contratos con proveedores especializados que aseguren la disponibilidad técnica y manteniendo un inventario de repuestos críticos que reduzca al mínimo los tiempos de inactividad.

Al mismo tiempo, resulta pertinente instalar un sistema de monitoreo remoto que permita la supervisión 24/7 del estado del grupo electrógeno, con protocolos de respuesta automática ante alarmas y pruebas mensuales bajo condiciones de carga real para garantizar la fiabilidad. Además, la gestión del combustible debe planificarse mediante contratos con proveedores confiables, análisis semestrales de calidad y un inventario que asegure al menos 72 horas de operación continua, evitando interrupciones en situaciones críticas.

Finalmente, de cara al futuro, la universidad debe considerar lineamientos estratégicos que potencien la sostenibilidad, la innovación tecnológica y el cumplimiento normativo.

En este aspecto, conviene planificar la posible expansión del sistema hacia otros bloques, evaluar la integración con sistemas de gestión energética y estudiar alternativas híbridas que incorporen fuentes renovables.

Asimismo, se recomienda monitorear el desarrollo de tecnologías emergentes como sistemas de almacenamiento o microrredes inteligentes, que podrían mejorar la eficiencia y optimizar la gestión de la energía. De manera complementaria, se deben implementar medidas de sostenibilidad ambiental como el uso de biocombustibles, la recuperación de calor residual y programas de compensación de emisiones.

Por último, el cumplimiento normativo debe fortalecerse mediante programas de actualización permanente, auditorías anuales y certificaciones voluntarias, mientras que la relación institucional con entidades como CNEL EP y el Cuerpo de Bomberos debe consolidarse mediante protocolos de coordinación y participación en programas comunitarios de respuesta a desastres. De esta manera, la Universidad Politécnica Salesiana no solo asegura confiabilidad y rentabilidad, sino también un posicionamiento estratégico en sostenibilidad y seguridad energética.

Bibliografía

- Ávila Zambrano, J. U., & Macías Muñoz, A. I. (2022). Rehabilitación del grupo electrógeno de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná en el bloque A [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio UTC. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9532>
- Bullon Salazar, J. C. (1974). Diseño de los sistemas eléctricos normales y de emergencia de un hospital de 250 camas [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/23956>
- Chakraborty, S., Ray, A., Bhattacharya, A., Mitra, I., Roy, A., & Basu, K. (2023). Emergency power supply system for critical infrastructures: Design and large scale hardware demonstration. *IEEE Access*, 11, 114509–114526. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3325198>
- Chowdhury, D., Miah, M. S., Hossain, M. F., Rahman, M. M., Hossain, M., Sheikh, M. N. U., Hasan, M. M. M., Sarker, U., & Hasan, A. S. M. K. (2019). Grid-connected emergency back-up power supply. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1903.02189>
- Contreras Paredes, C. A., & Altamirano Córdova, L. A. (2015). Diseño y construcción del sistema de alimentación de combustible con regulación automática del caudal de biogás para un grupo electrógeno de 2,5 kW. Universidad Nacional de Ingeniería. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/1341>
- Cuenca Churo, M. Á., & Enríquez Guillén, F. J. (2021). Estudio de la demanda para el dimensionamiento y fiscalización del montaje de generadores estacionarios para el campus Girón. [Tesis de pregrado, UPS – edición digital]. Repositorio UPS. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1881>
- D'Agostino, F., Gallo, M., Saviozzi, M., & Silvestro, F. (2023). A security-constrained optimal power management algorithm for shipboard microgrids with battery energy storage system. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2304.03621>
- Gallegos Londoño, C. M., Cevallos Chancusig, D. J., & Caicedo Cabrera, L. A. (2020). Modelo para mejorar la red de distribución de energía mediante grupo

electrógeno y apoyo con condensadores. *Revista Ingeniería Mecánica y Energía*.
https://www.researchgate.net/publication/345678901_Modelo_para_mejorar_red_con_grupo_electrogeno

- Grimaldo Gonzáles, J. A., & Garay Lozano, J. C. (2025). Sistema de monitoreo de variables de un grupo eléctrico [Proyecto aplicado, UNAD]. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/65809>
- Huang, Q., Huang, R., Hao, W., Tan, J., Fan, R., & Huang, Z. (2019). Adaptive power system emergency control using deep reinforcement learning. *arXiv*.
<https://arxiv.org/abs/1908.09980>
- Long, Q., Yu, H., Xie, F., Lu, N., & Lubkeman, D. (2020). Diesel generator model parameterization for microgrid simulation using hybrid box-constrained Levenberg-Marquardt algorithm. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2009.10425>
- Long, Q., Yu, H., Xie, F., Lu, N., & Lubkeman, D. (2020). Diesel generator model parameterization for microgrid simulation using hybrid box-constrained Levenberg-Marquardt algorithm. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2009.10425>
- Łosiewicz, Z., Mironiuk, W., Cioch, W., Sendek-Matysiak, E., & Homik, W. (2022). Application of generator-electric motor system for emergency propulsion of a vessel in the event of loss of the full serviceability of the diesel main engine. *Energies*, 15(8), 2833. <https://doi.org/10.3390/en15082833>
- Magallanes Ponguillo, J. A. (2025). Diseño de un sistema híbrido con grupo eléctrico y banco de baterías para alimentar grúa RTG reduciendo el consumo combustible. Universidad Politécnica Salesiana.
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25100>
- Marqusee, J., Ericson, S., & Jenket, D. (2021). Impact of emergency diesel generator reliability on microgrids and building-tied systems. *Applied Energy*, 285, Article 116443. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116443>
- Oña Oña, D. F., & Tinitana Bayas, G. E. (2011). Diseño y construcción de una cabina aislante para un grupo eléctrico de 7 kW [Tesis de pregrado, Escuela

- Politécnica Nacional]. Repositorio EPN.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3973>
- Ponce Gómez, A. M. (2023). Diseño del sistema eléctrico para la implementación y funcionamiento de la Clínica Internacional de la nueva sede San Borja [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ciencias e Ingeniería]. Repositorio UNAC.
- Shah, C., Shirazi, M., Wies, R., Cicilio, P., Hansen, T., & Tonkoski, R. (2022). High-fidelity model of stand-alone diesel electric generator with hybrid turbine-governor configuration for microgrid studies. arXiv.
<https://arxiv.org/abs/2204.13894>
- Shezan, S. A., Rawdah, S., Ali, S., & Rahman, Z. (2021). Design and implementation of an islanded hybrid microgrid system for a large resort center including diesel generator integration. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2107.01032>
- Sotomayor Mosquera, G. R. (2021). Diseño y construcción de un sistema de emergencia automático mediante grupo electrógeno. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional – 1980 revisitada en repositorio]. Repositorio EPN.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6029>
- Temoche Paz, H. R. (2024). Diseño de un sistema de control automático para evitar el corte de energía eléctrica en la empresa Fiorella Representaciones S.A.C. Universidad César Vallejo.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/134504>
- Torres Carrión, R. B., & Arias González, V. X. (2025). Diseño e implementación de un sistema de comunicación móvil de emergencia para solventar la falta de conectividad utilizando un UAV. Universidad Nacional de Loja.
<https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/27997>
- Tzounas, G. (2021). Small-signal stability techniques for power system modal analysis, control, and numerical integration. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2109.05042>
- Vaca Romo, P. O. (2021). Diseño e implementación de un sistema de monitoreo inalámbrico para transmisión de datos de un grupo electrógeno a una PC.

Universidad Politécnica Salesiana.

<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19935>